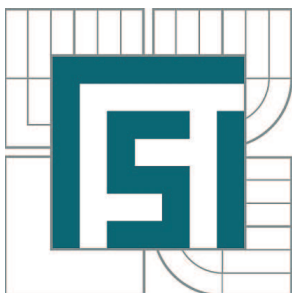


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA A VADY MASIVNÍCH ODLITKŮ

MANUFACTURE AND DEFECTS OF HEAVY CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ALEŠ VYMAZAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Aleš Vymazal

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba a vady masivních odlitků

v anglickém jazyce:

Manufacture and defects of heavy castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě masivních ocelových odlitků dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé řady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitku. Jedná se např. o vady typu vycezenin nebo lasturových lomů. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje věnovat zvláštní pozornost nejen metalurgii kovu a slévárenské technologii, ale současně se zaměřit na problematiku odvodu tepla v průběhu chladnutí a tuhnutí pomocí chladítek a optimalizaci velikosti nálitků.

Cíle diplomové práce:

V provozních podmínkách provést pro konkrétní odlitek ložiska analýzu stávající technologie. Po navržení změn v technologickém postupu provést u zkušebního odlitku detailní hodnocení vlastností kovu ve vybraných částech odlitku jak z pohledu mechanických vlastností, tak chemické homogenity a lidické čistoty oceli a případných slévárenských vad.

Seznam odborné literatury:

1. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
2. LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
3. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632- 9.
4. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků. Hutnické listy. 2009, roč. LXII, č. 5, s. 81-86. ISSN 0018- 8069.
5. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Podmínky tuhnutí těžkých odlitků a jejich vliv na vlastnosti odlitků. Slévárenství. 2010, roč. 58, č. 5-6, s. 136-140. ISSN 0037-6825.
6. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Problematika vad struktury u masivních ocelových odlitků. Technológ. 2010, roč. 2, č. 2, s. 193-198. ISSN 1337-8996.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je provést v provozních podmínkách analýzu stávající technologie pro konkrétní odlitek ložiska. Vyráběný slévárnou oceli ŽĐAS a.s., Žďár nad Sázavou. Po navržení změn v technologickém postupu provést u zkušebního odlitku detailní hodnocení vlastností kovu ve vybraných částech odlitku jak z pohledu mechanických vlastností, tak chemické homogenity a oxidické čistoty oceli.

Klíčová slova: vada, masivní, odlitek, ocel, optimalizace, výroba

ABSTRACT

Objective of diploma thesis is to proceed analysis of actual technology in operational terms for concrete casting of bearing. Constructed by foundry of steel ŽĐAS a.s., Žďár nad Sázavou. After designing changes in technological process accomplish detail evaluation of mechanical properties and chemical homogeneity of metal at selected parts of sample casting.

Key words: defect, massive, casting, steel, optimalization, production

Bibliografická citace:

VYMAZAL, A. *Výroba a vady masivních odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne: 27.5.2011

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji mému vedoucímu diplomové práce Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za poskytnuté rady a připomínky k této práci. Dále bych rád poděkoval ing. Vlastimilu Koldovi za poskytnuté rady ohledně numerických simulací.

OBSAH

| | |
|--|----|
| Abstrakt | 4 |
| Čestné prohlášení..... | 5 |
| Poděkování..... | 6 |
| 1. Úvod | 9 |
| 1.1. Cíle diplomové práce | 9 |
| 2. Vady masivních odlitků | 9 |
| 2.1. Typické vady masivních odlitků..... | 11 |
| 2.1.1. Vnitřní trhliny..... | 11 |
| 2.1.2. Praskliny | 12 |
| 2.1.3. Stvolové vycezeniny | 13 |
| 2.1.4. Makrosegregace | 14 |
| 2.1.5. Nekovové vměstky | 15 |
| 2.1.6. Lasturové lomy | 17 |
| 3. Optimalizace slévárenské technologie | 18 |
| 3.1. Numerická simulace původní technologie | 18 |
| 3.1.1. Plnění odlitku | 19 |
| 3.1.2. Tuhnutí odlitku | 19 |
| 3.1.3. Rozsah porezity odlitku | 20 |
| 3.2. Postup optimalizace slévárenské technologie | 23 |
| 4. Popis experimentu | 26 |
| 4.1. Vedení tavby..... | 26 |
| 4.2. Odlévání | 27 |
| 5. Měření teplotních polí odlitku | 28 |
| 5.1. Naměřené výsledky | 29 |
| 5.2. Porovnání skutečných teplotních křivek a křivek vypočtených numerickou simulací | 31 |
| 5.3. Porovnání hodnot vypočtených v programu Procast s reálnými naměřenými hodnotami..... | 34 |
| 5.4. Porovnání hodnot vypočtených pomocí programu Magma s reálnými hodnotami..... | 35 |
| 6. Vyhodnocení jakosti zkušebního odlitku | 36 |
| 6.1. Zkoušky mechanických vlastností | 37 |
| 6.2. Chemické složení | 40 |
| 6.3. Metalografie..... | 42 |

| | |
|--|----|
| 6.3.1. Vyhodnocení metalografie | 48 |
| 6.4 Vizuální kontrola podnálitkové oblasti | 48 |
| 6.5 Defektoskopické zkoušky | 50 |
| 7. Ekonomické zhodnocení | 51 |
| 8. Závěr | 52 |

1. ÚVOD

Vady ocelových odlitků a s nimi související zmetkovitost jsou jevy neodlučitelně spjaté s výrobou ocelových odlitků. Vlivem pomalého tuhnutí masivních ocelových odlitků, dochází ke vzniku celé řady vad. Jedná se např. o vady typu vycezenin nebo lasturových lomů, odmíšení, vnitřních trhlin atd. Proto je při produkci masivních odlitků vyžadováno věnovat zvláštní pozornost nejen metalurgii kovu a slévárenské technologii, ale současně zacílit na problematiku odvodu tepla během chladnutí a tuhnutí pomocí chladítek a optimalizaci velikosti nálitků [1], [2].

Vady odlitků oceli způsobené metalurgií, anebo jednodušeji „metalurgické vady“ jsou ve svém důsledku nežádoucí a nepříjemný problém, který značně komplikuje plynulost výroby oceli i odlitků. Kromě ekonomických ztrát jsou také příčinou četných nedorozumění mezi pracovníky zajišťujícími výrobu odlitků vzhledem k tomu, že téměř každá vada je výsledkem mnoha příčin, jejichž podíl na konečné zmetkovitosti je možno obvykle rekonstruovat jen s jistou přibližností. S takovouto přibližností jsou také spojeny obtíže při hledání cest, jak vzniku vad předcházet během výroby [1].

Diplomová práce je součástí projektu TIP č. FR – T11/070 – Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků. Tento projekt má za cíl dosažení nižších nákladů na výrobu masivních ocelových odlitků pomocí snížení množství vad a zvýšením využití množství kovu [3].

1.1. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V provozních podmínkách provést pro konkrétní odlitek ložiska z materiálu GS20Mn5 analýzu stávající technologie. Po navržení změny v technologickém postupu provést u zkušebního odlitku detailní hodnocení vlastností kovu ve vybraných částech odlitku jak z pohledu mechanických vlastností, tak chemické homogenity a oxidické čistoty oceli a případných slévárenských vad.

2. VADY MASIVNÍCH ODLITKŮ

Termínem „vada“ kovového materiálu se obecně označuje nedokonalost, která má původ přímo ve výrobním procesu polotovaru nebo hotové součásti. Vada zaviněná metalurgií, nebo stručněji metalurgická vada ocelového odlitku je z tohoto hlediska vada,



Obr. 2.1. Masivní odlitek vyráběný slévárnou ŽDAS a.s. [3].

kteřá je důsledkem nedostatků v metalurgii výroby oceli, popřípadě odchylek od standardního průběhu jednotlivých fází tavby, nebo tepelného zpracování [1].

Je nutné si uvědomit, že ani ten nejdokonalejší metalurgický a technologický postup nezaručí výrobu ocelových odlitků bez vzniku vad. Výsledné požadavky na jakost každého odlitku plynou ze způsobu jeho využití a hlavně z podmínek zatěžování po celou dobu exploatace [1].

Obecně se všichni výrobci těžkých odlitků potýkají s vadami zapříčiněnými pomalým chladnutím a tuhnutím odlitků. Vzhledem k tomu se v masivních odlitcích

často vyskytují nejen běžné vady související např. s rozměrovou přesností apod., ale i vady specifické pouze u masivních odlitků. Některé druhy vad typických pro masivní odlitky vedou k nedodržení technických dodacích podmínek. K těmto neshodám patří např. neprůchodnost ultrazvukových vln, která je způsobená hrubozrnnou strukturou a primárním zrnem, s čímž je v přímé souvislosti segregace příměsí, legujících prvků a následný vznik vycezenin. Pak to jsou indikace lineárních vad při nedestruktivních zkouškách, které souvisejí s oslabením primární struktury. S hrubozrnnou strukturou v silnostěnných průřezech souvisí také snížení mechanických vlastností oceli v masivních průřezech odlitků [4].

Výše uvedené vady a snížení hodnot mechanických vlastností v silnostěnných průřezech odlitků vedou ke zvýšení nákladů na opravy, tepelné zpracování, nebo v některých případech i k neshodným výrobkům. Opravy jsou však časově náročné a výrazně zvyšují náklady na výrobu. V mnoha případech dochází k prodloužení celkové doby výroby tak, že dochází k nesplnění termínů dodávky, což může být důvodem ztráty zákazníka. Zvládnutí technologie, jež umožní vyrábět masivní odlitky s nižším objemem vad vede ke snížení náročnosti oprav a výrobních nákladů [4].

Z výše uvedeného pohledu je nejproblémovějším místem odlitku podnálitková oblast pod masivním nálitkem. V současnosti probíhá výzkum VUT v Brně a slévárny ŽďAS, a.s., v rámci projektu MPO, který je zaměřen právě do oblasti vad v podnálitkových oblastech, jehož součástí je tato diplomová práce [4].



Obr. 2.2. Zkušební odlitek – ložisko vyráběné slévárnou Žďas a.s. [4].

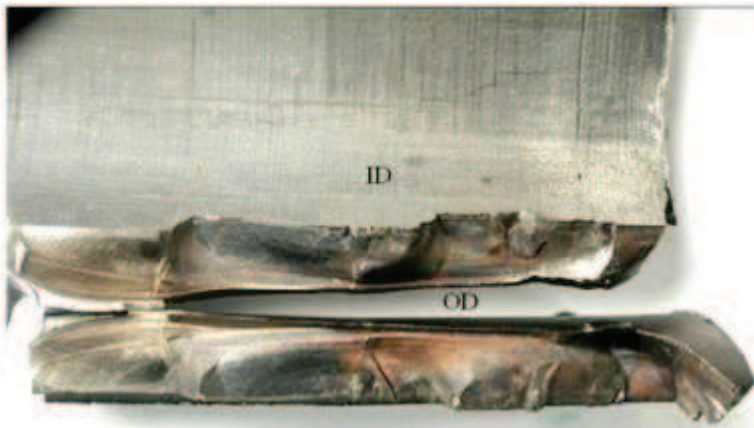
2.1. TYPICKÉ VADY MASIVNÍCH ODLITKŮ

V masivních odlitcích se nejčastěji vyskytují vady související s pomalým tuhnutím a to jsou následující vady vnitřní trhliny, praskliny, stvolové vycezeniny, segregace a nekovové vměstky. Kromě těchto vad se v masivních odlitcích vyskytují běžné slévárenské vady.

2.1.1. VNITŘNÍ TRHLINY

Trhlinou se rozumí vada porušení soudržnosti struktury odlitku při vysokých teplotách. Trhlina vzniká po hranicích primárně krystalizovaných zrn při vysokých teplotách v blízkosti solidu přibližně 100° C pod solidem, kdy je rozhraní zrn méně pevné nežli samotné zrno. Snížení pevnosti rozhraní za vysokých teplot je způsobeno segregací prvků s nižším bodem tání. Vzhledem k tomu je průběh trhliny (na rozdíl od praskliny) křivolaký. Trhlina vykazuje interkrystalický hrubozrný lom a většinou zoxidovaný povrch. [5], [6], [7].

Rozsah vady se v zásadě řídí velikostí a hmotností odlitku, příčinami jejího vzniku a také podmínkami v určité výrobní fázi odlitku, kdy k poruše souvislosti dochází. Ke vzniku vady může dojít v různých etapách výroby, např. během chladnutí odlitku ve formě z vysokých teplot po ztuhnutí odlitku; v tom případě jde o vnitřní trhlinu, jejíž průběh sleduje hranice zrn, její lom je hrubozrný a rozsah vady není příliš velký. [5].



Obr. 2.3. Příklad vnitřní trhliny [8].

Příčiny vzniku vady:

- Velké teplotní gradienty v průřezu odlitku.
- Rychlé změny teplot, což vede ke vzniku pnutí.

V momentu ztuhnutí nemá materiál příliš vysokou plasticitu, takže se porušuje zcela křehce, a to i při nízkém zatížení. Poklesem teploty v úzkém teplotním intervalu (přibližně 10°C) dojde k náhlému zvýšení plasticity, při malé změně pevnosti vznikne „zašpičatělý“ plastický lom [7], [5].

Opatření k zabránění vzniku a odstranění vady:

Adekvátním opatřením proti tvorbě vnitřních poruch souvislosti materiálu je snížení teplotních rozdílů zejména v oblasti teplot přechodu materiálu do pružných deformací a zajištění pomalých změn teplot v celé etapě výroby, především u ocelových odlitků s vyšším obsahem uhlíku nebo legujících prvků [5].

2.1.2. PRASKLINY

Jedná se o mírně zakřivené a křivolaké roztržení stěny odlitků, vzniklé při nízkých teplotách, při nichž má slitina pružné deformace. Praskliny mohou vznikat i po úplném vychladnutí odlitku ve formě, popř. během vytloukání nebo po předčasném vyjmutí odlitků z formy, anebo též v průběhu následujícího tepelného zpracování. Pro šíření prasklin je příznačné nestabilní šíření. Povrch praskliny je zpravidla zrnitý a čistý, někdy barevně naběhlý až zřetelně zoxidovaný, podle toho při jaké teplotě a v které fázi výroby odlitku prasklina vznikla, zda během chladnutí ve formě, při odřezávání nálitků a vtoků kyslíkem, nebo při tepelném zpracování [1], [5].

Příčiny vzniku:

Praskliny vznikají pod účinkem napětí odlitku, která jsou při chladnutí důsledkem velkých rozdílů teplot jednotlivých částí odlitku, nebo časově posunutých strukturních (fázových) přeměn v různých částech odlitku. Praskliny mohou vzniknout, chladne-li odlitek v příliš tuhé, nepoddajné formě, jež mu brání ve smršťování. Sklon k prasklinám je podporován velkými rozdíly v tloušťkách stěn odlitku. Nesprávná konstrukce odlitku, např. ostré přechody z tenkých do tlustých stěn, jakož i nevhodné umístění vtokové soustavy a nálitků, jež vedou k velkým gradientům teplot v odlitku, mohou mít významný vliv na výskyt prasklin. Dle poznatků autorů [1], kteří se zaměřují na příčiny vzniku prasklin z metalurgického hlediska. Dochází ke vzniku prasklin vlivem:

- Chemické nehomogenity fosforu, uhlíku a manganu.
- Apriorních defektů v oceli, tj. defektů spojených převážně s metalurgickým procesem.
- Lomové houževnatosti oceli, která vyjadřuje její odolnost proti nestabilnímu šíření defektu. [1], [5]

Opatření k zabránění vzniku a odstranění vady:

Opatření je třeba směřovat ke konstrukci odlitku, konstrukci a výrobě slévárenské formy a též do oblasti metalurgie. Dle autorů [1], [5] je doporučeno:

- Navrhovat odlitky pokud možno se stejnými tloušťkami stěn.
- Vtokový systém a nálitky by měly být uspořádány tak, aby se usměrněným tuhnutím omezilo místní přehřátí odlitku na co možnou nejmenší míru.
- Během oxidačního údobí tavby zajistit co nejlepší odfosfoření a při tavbách vybírat vsázku s nízkými obsahy fosforu a síry.
- V redukčním údobí zajistit co nejnižší obsahy síry a kyslíku, zajistit optimální odpichovou teplotu na dolní hranici předepsaného nebo požadovaného rozmezí.
- Udržovat obsah legujících prvků na dolní hranici předepsaného nebo požadovaného rozmezí.
- Provést modifikaci vměstků na typ I.b, aby nedošlo k lokálnímu zpevnění matrice a tím posunu mechanismu lomu od tvárného ke křehkému [1], [5].

2.1.3. STVOLOVÉ VYCEZENINY

Vycezeniny jsou místa zvýšené koncentrace odměšujících prvků, příměsí a nečistot, jakož i splodin různých reakcí, jež probíhají v kovu při selektivním tuhnutí. Jsou to poruchy homogenity v pravidelné krystalické struktuře, vyplněné matečnou, na příměsí obohacenou taveninou. Obsahující zvýšený podíl S, P, C ale také Mn, Mo aj. Vznikají v těžkých masivních odlitcích a ingotech, kde jsou k tomu teplené podmínky a podmínky pro segregaci [5].

Stvolové vycezeniny mají nejčastěji podobu tmavých pásů, orientovaných rovnoběžně se svislou osou odlitku (z hlediska polohy při odlévání), přičemž mají zvýšený obsah těchto prvků: síry, fosforu a uhlíku. I když stvolové vycezeniny zřetelně porušují homogenitu a strukturu odlitku, nemohou být považovány za vadu odlitku zaviněnou výrobcem, jelikož jsou výsledkem zákonitého fyzikálního procesu, který dosud neumíme ovládat. Za vadu odlitku jsou považovány v případě, když vyúsťují až na povrch odlitku, např. po jeho opracování, nebo vrtáním otvoru ve střední oblasti masivního odlitku. V těchto případech je nutno existenci otevřených vycezenin předvídat. Jelikož jejich oprava zavařením není zpravidla možná (malý a hluboký otvor pro opravu) [5], [9].

Příčiny vzniku:

1. Skupina plynových hypotéz.
2. Skupina rozdílné hustoty obohacené taveniny a zbývající tekuté fáze.
3. Skupina působení gravitace a objemového smrštění [9].

Opatření k zabránění vzniku vady:

Tuto vadu nelze úplně eliminovat. Hlavní příčinou tvorby stvolových vycezenin je uhlíková reakce. Druhy výskytu stvolových vycezenin jsou tři a to následující: segregační pásy, pásové řediny a bublinové kanály. Vznik stvolových vycezenin závisí na obsahu uhlíku v oceli. Oceli podeutektoidní jsou k těmto vadám náchylné méně, než oceli eutektoidní či nadeutektoidní. Dezoxidací s výrazným zbytkovým obsahem dezoxidačních prvků je možné snížit rozsah výskytu vady. Dalším významným způsobem jak snížit rozsah stvolové vycezeniny, je provést rafinaci síry a fosforu. Velký vliv na snížení rozsahu stvolových vycezenin má zvýšení rychlosti tuhnutí [9], [10].

2.1.4. MAKROSEGREGACE

Odmíšení jako vada homogenity a struktury odlitku je výsledkem fyzikálního děje v důsledku selektivní krystalizace, tzn. tuhnutí taveniny v rozmezí teplot likvidu a solidu, v průběhu určité doby. V průřezu odlitku tak dojde k chemické heterogenitě [5].

Příčiny vzniku vady:

Původní příčina vzniku makrosegregace (segregace vůbec) spočívá v rozdílné rozpustnosti jednotlivých prvků v tekuté a pevné fázi. Při krystalizaci slitiny – taveniny s více prvky dochází k jejich segregaci, takže ztuhlá fáze je o některé prvky ochuzena a tavenina naopak obohacena (matečná tavenina) vůči původnímu složení taveniny. Méně rozpustné prvky jsou vytlačovány, koncentrují se ve zbylé matečné tavenině, jejíž teplota tání klesá a doba tuhnutí se tím prodlužuje [5].

U takové slitiny s rozdílnými teplotami tání jednotlivých složek dochází k začátku tuhnutí při teplotě likvidu a konci tuhnutí odlitku při teplotě solidu (v pevné fázi), čili k selektivnímu tuhnutí. Segregace je tudíž průvodním jevem selektivního tuhnutí. Ve větším rozsahu a prokazatelněji probíhá makrosegregace u větších a masivních odlitků (ingotů), kde jsou vytvořeny teplotní podmínky pro průběh děje (dlouhodobé působení vysokých teplot) a u materiálu obsahující větší podíl segregujících prvků v tavenině [5].

Rozsah se řídí také rychlostí tuhnutí a stupněm dendritického odmíšení. Obecně lze říci, že při nízké rychlosti tuhnutí, tedy při dlouhodobém působení vysokých teplot se vlivem difuze sníží stupeň dendritického odmíšení a zvýší se stupeň pásmového odmíšení – makrosegregace. Matečná tavenina obohacená o příměsi s nízkým bodem tání postupuje „za teplem“ do středu odlitku a vlivem nižší měrné hmotnosti také do horních oblastí odlitku; proto s rozměrem odlitku je makrosegregace výraznější (přímá i vertikální). Naopak vysoká rychlost tuhnutí neumožňuje vyrovnaní chemického složení v oblasti dendritu, kde zůstává velký stupeň odmíšení a makrosegregace je nižší [5].

Stupeň makrosegregace vzrůstá s intervalem krystalizace, šířkou pásma tuhnutí, vyšší měrnou hmotností taveniny, vyšší viskozitou a povrchovým napětím taveniny. Také velký obsah plynů rozpuštěných v tavenině zvyšuje makrosegregace, neboť jejich vylučováním při tuhnutí stoupá tlak a plyny vytvářejí cestu v matečné tavenině směrem do středu k tepelné ose a do horních částí masivního odlitku. Důkazem je také skutečnost, že pásmo plynových bublinek v odlitku je zpravidla obohaceno o vycezeniny; tento jev se také označuje jako plynové vycezeniny. Stupeň pásmového odmíšení také snižuje malá rychlost lití a nízká teplota taveniny, ale naopak velké průřezy nálitků a rušená krystalizace např. při odstředivém lití, vibrací apod., pásmové odmíšení zvyšují. Určitých kladných výsledků ve snížení stupně segregačních procesů se dosahuje moderními metalurgickými pochody, zvláště mimopecní metalurgií [5].

Opatření k zabránění vzniku vady a odstranění vady:

Jak bylo řečeno, segregaci není možno zcela zabránit, je výsledkem zákonitého děje při tuhnutí lze ji však částečně omezit. Účinným opatřením je snížení obsahu prvků náchylných k segregaci v tavenině, tudíž C, S, P, O₂ a to na minimální hranici. A naopak přísada prvků, které zjemní zrna a zrovnoměří strukturu (Mo, Ni, Cr aj.). Účinným opatřením ke snížení rozsahu makrosegregací je nízká teplota, nižší rychlost lití a vyšší rychlost tuhnutí, které snižují makrosegregační účinky [5].

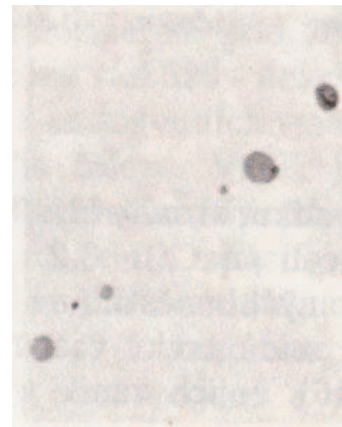
Určité snížení stupně segregací poskytují výrobní technologie včetně vakuování a odlévání ve vakuu, filtrace (promíchávání taveniny po určitou dobu při tuhnutí inertními plyny apod.) [5].

2.1.5. NEKOVOVÉ VMĚSTKY

Mikročistota, která neodpovídá požadavkům norem a sjednaných technických přejímacích podmínek. Pod pojmem mikročistoty se zahrnuje vyjádření množství (objemového, popř. plošného), počtu, velikostí, tvaru a rozložení vměstků různého chemického složení. [5].

Příčiny vzniku vady:

Nekovové vměstky v nelegovaných až vysokolegovaných ocelích jsou všeobecně produktem metalurgické fáze výroby oceli. Tyto vměstky jsou tvořeny oxidy, sulfidy a nitridy. Jejich vznik je možný přímo v tavenině bez přítomnosti pevné fáze, tj. nad teplotou likvidu. Velká část těchto vměstků může vyplouvat do strusky. Hlavní část těchto vměstků vzniká během závěrečné dezoxidace oceli, dále během odlévání a tuhnutí jak nad teplotou likvidu, tak mezi likvidem a solidem tuhnoucí slitiny [5], [11].



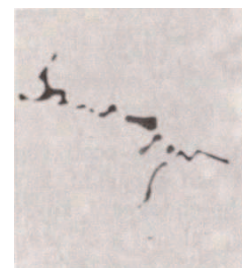
Rozdělení nekovových vměstků:

I. typ vměstků je tvořen komplexními oxysulfidickými vměstky globulárního tvaru, náhodně rozložených v základní kovové hmotě. Vměstky prvního typu se vyskytují

Obr. 2. 4. vměstky I. typu [5].

v neuklidněných ocelích. Při výrobě oceli na odlitky se mohou vyskytnout vměstky I. typu v tavnách nedostatečně dezoxidovaných, ve kterých se obvykle vyskytují také bubliny CO. První typ vměstků se může vyskytnout i v dobře dezoxidovaných ocelích v některých místech odlitku jako důsledek deoxidace oceli během plnění formy kovem. Na chemickém složení těchto vměstků se podílí hlavně mangan, křemík, síra, kyslík a v nepatrné míře hliník. Jejich vznik je podmíněn vysokým obsahem aktivního kyslíku, nízkými obsahy hliníku (pod 0,01%) a uhlíku (pod 0,1%) [5], [12].

Při obsahu cca 0,020 až 0,025 % Al a pod 0,2 % C vzniká II. typ vměstků. Jsou to sulfidy manganu a železa často doprovázené oxidy Al_2O_3 , které mohly sloužit jako krystalizační zárodky. Oxid hlinitý tvoří hranaté vměstky a roste přímo z taveniny i při teplotách mnohem vyšších než je teplota likvidu. Rozpustnost síry v rostoucích dendritech feritu nebo austenitu je menší než v tavenině. Tavenina mezi dendrity se proto obohacuje o síru. Když je tavenina v mezidendritických prostorách nasycena sírou vyloučí se síra jako sulfid manganu. Přítomnost sulfidů II. typu snižuje výrazně hodnoty houževnatosti, příp. kontrakce, méně hodnoty tažnosti [5], [12].

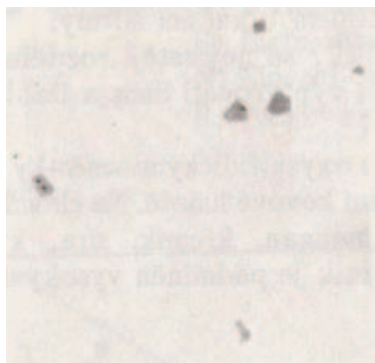


Obr. 2. 5. II. typ vměstků. [5].

III. typ vměstků je tvořen převážně sulfidy manganu obsahující někdy oxidické jádro oxidu hlinitého, které se vyznačují polygonálním hranatým tvarem a jsou náhodně rozloženy v základní kovové hmotě obr. 2.7. Jejich vznik je podmíněn nízkým obsahem aktivního kyslíku, obsahy [%] Al nad 0,05 % při [%] C \rightarrow 0,0; resp. při [%] Al \rightarrow 0,03 je-li [%] C > 0,2 [5].

IV. typ vměstků je tvořen shluky velmi jemných vměstků na bázi oxidu hlinitého při dezoxidaci hliníkem, nebo na bázi oxidů prvků vzácných zemin, jestliže bylo k dezoxidaci použito KVZ obr. 2.6. Jejich vznik je podmíněn nízkým obsahem aktivního

kyslíku a přebytky dezoxidačních prvků např. Al, KVZ aj. V ocelích s obsahem uhlíku nad 0,40% a obsahem hliníku nad 0,060% [5],[12].



Obr. 2. 6. vměstky
III. typu [5].



Obr. 2. 7. vměstky
IV. typu [5].

Opatření k zabránění vzniku a odstranění vady:

Tvorba endogenních vměstků je průvodním jevem metalurgického procesu výroby slitin železa. Vznik jistého typu endogenních vměstků je v hlavní míře určen závěrečnou dezoxidací ocelí v pánvi, avšak významně se na formování vměstků podílí způsob, jakým je při tavení oceli v zásadité el. obloukové peci vedeno redukční údobí, a to jak předběžná, tak zejména závěrečná dezoxidace oceli [5].

Jako nejvíce škodlivé se jeví sulfidické vměstky II. typu, které jsou spojeny s poklesem plastických vlastností oceli, tažnosti a zvláště kontrakce, a též se snížením vrubové houževnatosti. V tlustostěnných odlitcích zvyšují sklon k trhlinám i prasklinám. Po dezoxidaci hliníkem se přidává do oceli vápník. V důsledku modifikace vznikají oxisulfidy obsahující mimo kyslík, síru dále mangan, křemík, hliník a vápník. Cílem modifikace je změnit vměstky na typ I.b, který má nejmenší vliv na plastické vlastnosti. Dalším způsobem jak snížit obsah sulfidických vměstků je snížení obsahu síry [5], [12].

2.1.6. LASTUROVÉ LOMY

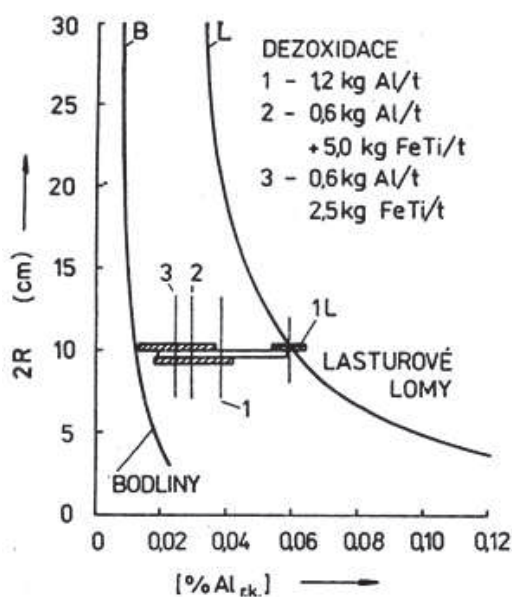
Pro lasturový lom je charakteristický lom probíhající na hranicích primárních austenitických zrn. Ke vzniku primárních austenitických zrn dochází při tuhnutí a chladnutí odlitků. Na iniciaci lasturových lomů se podílí nitrid hliníku a vlastní lomová plocha se vytváří dutinovým mechanismem. Lom je provázen poklesem tažnosti, kontrakce a lomového napětí. S výskytem lasturového lomu dochází ke snížení únavových charakteristik ocelí [2], [13].

Příčiny vzniku vady:

V ocelích s velmi nízkým obsahem dusíku nebo hliníku se lasturové lomy netvoří. Při výrobě oceli na obloukových pecích jsou výsledné obsahy dusíku v nelegovaných ocelích obvykle 90 až 130 ppm. Při takovém obsahu dusíku je nutné po dezoxidaci hliníkem počítat se vznikem nitridu hliníku. V případě masivních, pomalu tuhoucích a chladnoucích odlitků, se nitrid hliníku přednostně vylučuje po hranicích primárních austenitických zrn, a to již při poměrně nízkých koncentracích hliníku, určeného jako hliník rozpustný v kyselině - $Al_{r,k}$ (pro běžný obsah dusíku v oceli cca 0,100 hm.%) [2], [13].

Opatření k zabránění vzniku lasturových lomů:

Lasturový lom lze omezit prvky, které zjemňují primární austenitické zrna a tvoří s dusíkem nitridy stabilnější než nitrid hliníku. K těmto prvkům patří titan, zirkonium, niob molybden, a také síra. Při kombinované dezoxidaci hliníkem a titanem váže hliník kyslík a titan dusík. Titan působí substituční zpevnění matrice a zvyšuje sklon ke vzniku trhlin. Koncentrace titanu v oceli se doporučuje vyšší než 0,040%, pro těžké odlitky vyšší než 0,030%. Zirkonium má vyšší dezoxidační účinek i denitrační účinek než titan a váže se jak na dusík, tak na kyslík. Což znamená, že v kombinaci s hliníkem musí být výsledné rozptyly prvků v provozních tvábkách větší než při použití titanu. Při kombinované dezoxidaci Al a Zr není zcela jisté zabránění vzniku lasturových lomů [2], [13].



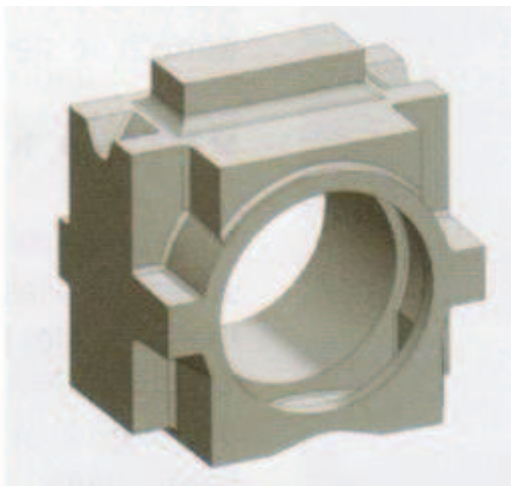
Obr. 2.8. Mezní křivky výskytu lasturového lomu a bodlin v závislosti na směrodatné tloušťce odlitku pro ocel C=0,28% a N=0,010% [2].

3. OPTIMALIZACE SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE

Cílem optimalizace slévárenské technologie bylo navržení nápravných opatření, které povedou v podmínkách slévárny ŽĐAS, a. s. ke snížení výskytu vad a snížení nákladů na výrobu odlitku. Jako experimentální odlitek byl zvolen odlitek ložiska z nelegované oceli GS20Mn5. U sledovaného odlitku se vady vyskytují v největší míře v podnálitkové oblasti.

V první fázi řešení byla provedena simulace plnění, chladnutí a tuhnutí odlitku v programu ProCAST. Simulace byla provedena firmou MECAS ESI s.r.o. Z výsledků simulací vyplynulo, že používaná technologie zajišťuje usměrněné tuhnutí do nálitku bez vzniku staženin a ředin v odlitcích. Optimalizace technologií byla možná pouze změnou intenzifikace chladnutí odlitku pomocí chladítek a redukcí velikosti nálitku [14].

Nová technologie zahrnující zejména použití kontaktního chladítka ve spodní partii odlitku a zmenšení objemu nálitku. Během odlévání a následného tuhnutí byla měřena teplota v kovu a ve formě. Součástí experimentu bylo i použití kamer pro sledování plnění dutiny formy. Po otryskání a tepelném zpracování odlitku se předpokládá provedení dalších zkoušek pro posouzení navržené technologie (nedestruktivní kontrola, detekce a analýza vad, analýza vlastností kovu v nálitku a ve vybraných částech odlitku apod.) [14].



Obr. 3.1. Zkušební odlitek [4].

3.1. NUMERICKÁ SIMULACE PŮVODNÍ TECHNOLOGIE

Výpočet byl proveden zejména se zaměřením na odhalení kritických míst v odlitku s ohledem na jeho plnění a tuhnutí. Výpočet by měl napomoci při rozhodování o případné změně tvaru a umístění nálitků, chladítek a dalších technologických částí. Součástí výpočtu byla rovněž predikce vzniku staženin a ředin v odlitku [15].

Geometrie vlastního odlitku, jader a formy byla dodána zadavatelem (Ždas a.s.). Povrchová a objemová síť všech částí řešené soustavy, tvořená metodou konečných prvků (FEM), byla vytvořena v programu VisualCAST. Definice počátečních a okrajových podmínek výpočtu byla provedena v modulu PreCAST programu ProCAST. Po kontrole provedených definicí byl spuštěn výpočet plnění dutiny formy, tuhnutí odlitku a predikce vzniku slévárenských vad typu staženin a ředin [15].

Tab. 3.1. Okrajové podmínky použité pro numerickou simulaci [15].

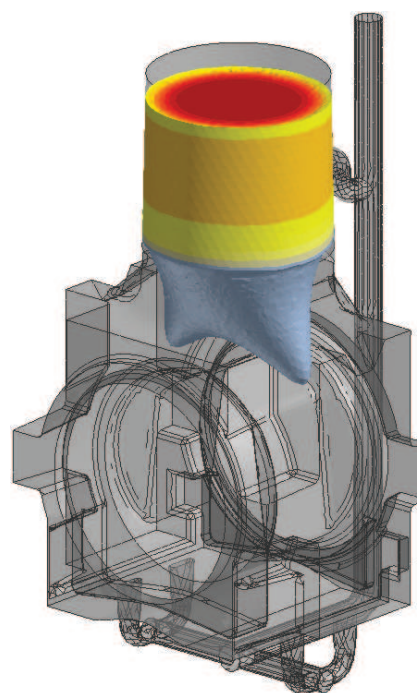
| Podmínka | Údaj |
|-----------------------|---|
| Materiál odlitku | GS20Mn5 |
| Chemické složení kovu | C=0.2, S=0.5, Mn=1.3, P=0.02, S=0.01, Al=0.025, |
| Forma | 10cm - chromit, zbytek křemen, poč. teplota 20 °C |
| Jádra | Chromit, poč. teplota 20 °C |
| Zásip hladiny nálitků | Expandovaný exozásip |
| Izolace | Izolační cihla Izospar |
| Chladítka | Materiál 11523 |
| Doba lití [s] | 90 po krček, 170 celý odlitek |
| Teplota lití | 1590 °C |
| Teplota okolí | 20 °C |
| Průřez licího proudu | 100 mm |

3.1.1. PLNĚNÍ ODLITKU

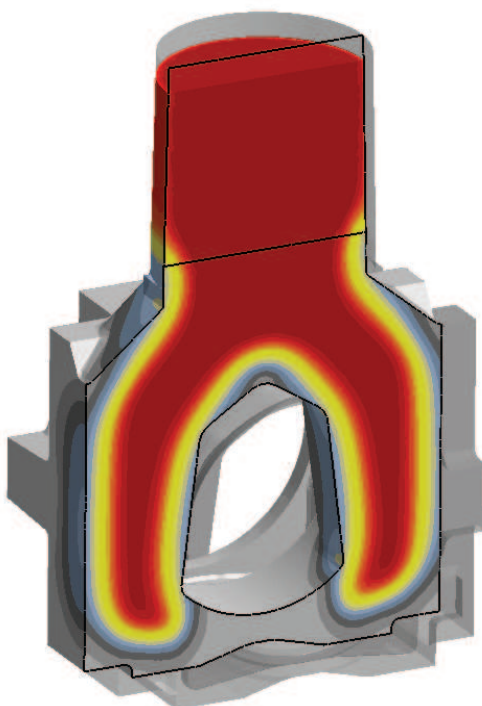
Teplota lití byla zvolena podle dodaných podmínek 1590 °C. Z dané geometrie vtokové soustavy a podmínek odlévání byla simulací vypočtena doba lití 161 sekund, což koresponduje s provozně dosahovanou dobou lití uvedenou v počátečních podmínkách. Během této doby poklesla teplota odlitku o 40 - 50 °C v místech v okolí chladítek o 80 - 100 °C. Plnění probíhá plynule a na chování proudu kovu se neprojevuje žádný nežádoucí jev. Rychlost kovu na vstupu do vtokové soustavy byla přibližně 1 m/s odlitkem kov stoupá rychlostí nižší než 0,2 m/s [15].

3.1.2. TUHNUTÍ ODLITKU

Použitá technologie se ukazuje být vyhovující z hlediska eliminace tepelných uzlů, neboť všechny tepelné uzly jsou vytlačeny do nálitků a v odlitku nedochází k oddělování front tuhnutí. Přestože velikost chladítek ve spodní partii je poměrně malá (vůči ochlazovanému objemu odlitku) a dochází velice brzy k jejich tepelnému „vyčerpání“, tvar odlitku napomáhá tomu, že tuhnutí je odděleno na dvě sekce-ramena, které se celé následně vytahují do středového nálitku. Dosazovací klín z nálitku je velice dlouhý a z tohoto důvodu dochází v jeho tepelné ose ke vzniku mikroporozity – obr. 3.2., přestože celý tento uzel je přesunut do nálitku [15].



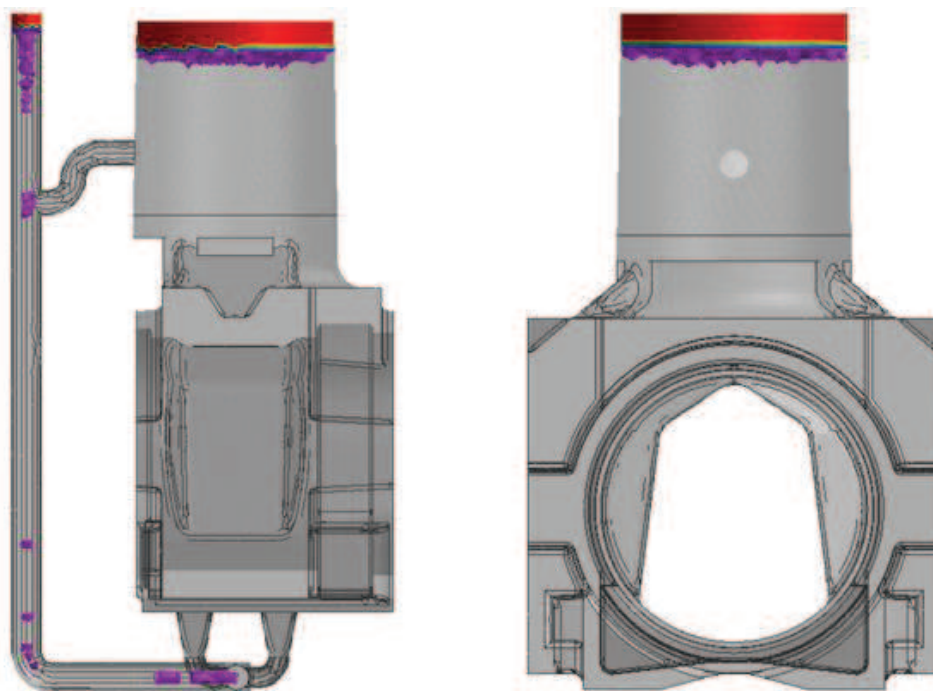
Obr.3.2. Podíl tuhé fáze při tuhnutí [15].



Obr. 3.3. Podíl tuhé fáze při tuhnutí [15].

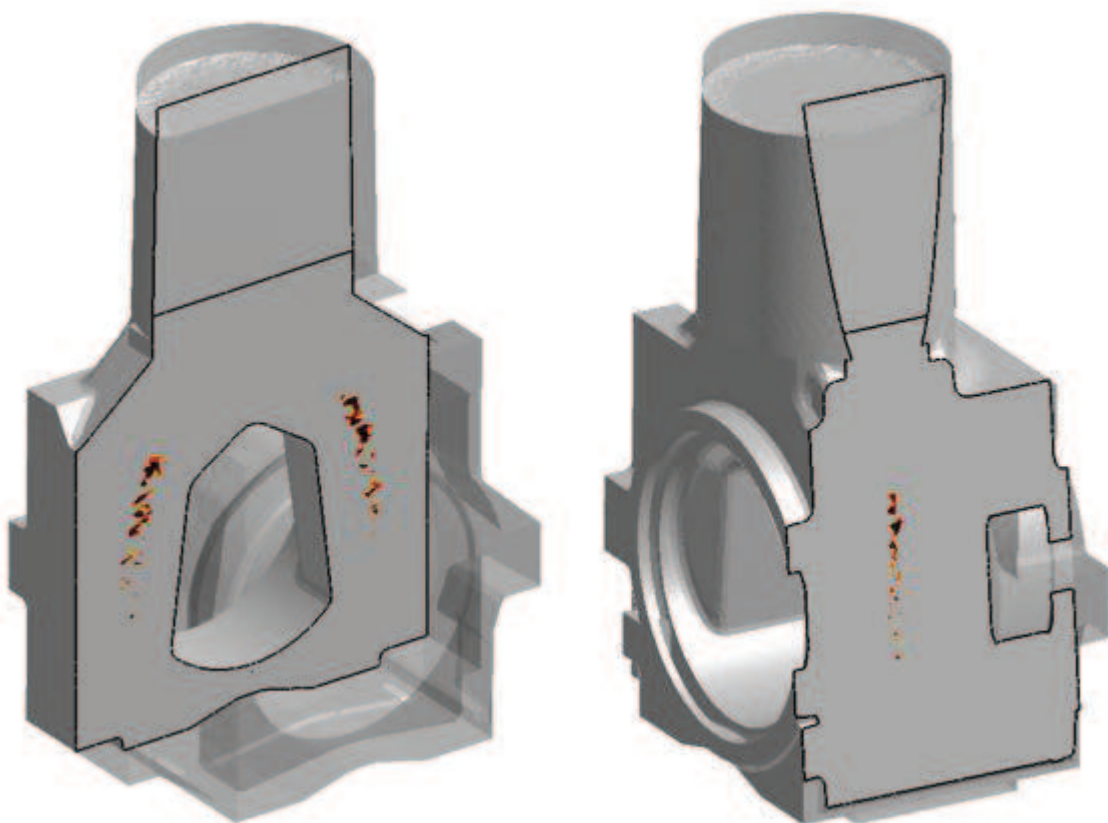
3.1.3. ROZSAH POREZITY ODLITKU

Na obrázku 3.4. je znázorněna predikce vzniku makroporezity v odlitku. Při nastavení kritických hodnot pro zobrazování této vady (úbytek kovu v objemovém elementu větší než 10%), nebyl výskyt makroporezity v odlitku pozorován mimo stažení a úbytek kovu v nálticích a ve vtokové soustavě [15].



Obr. 3.4. Predikce makrostaženin [15].

Predikce vzniku mikrostaženin je naznačena na obrázku 3.5. (úbytek kovu v objemovém elementu menší než 1%). Mikrostaženiny byly nalezeny v tepelné ose a vznik této vady odpovídá přerušení dosazování kovu do mezidendritických prostor [15].

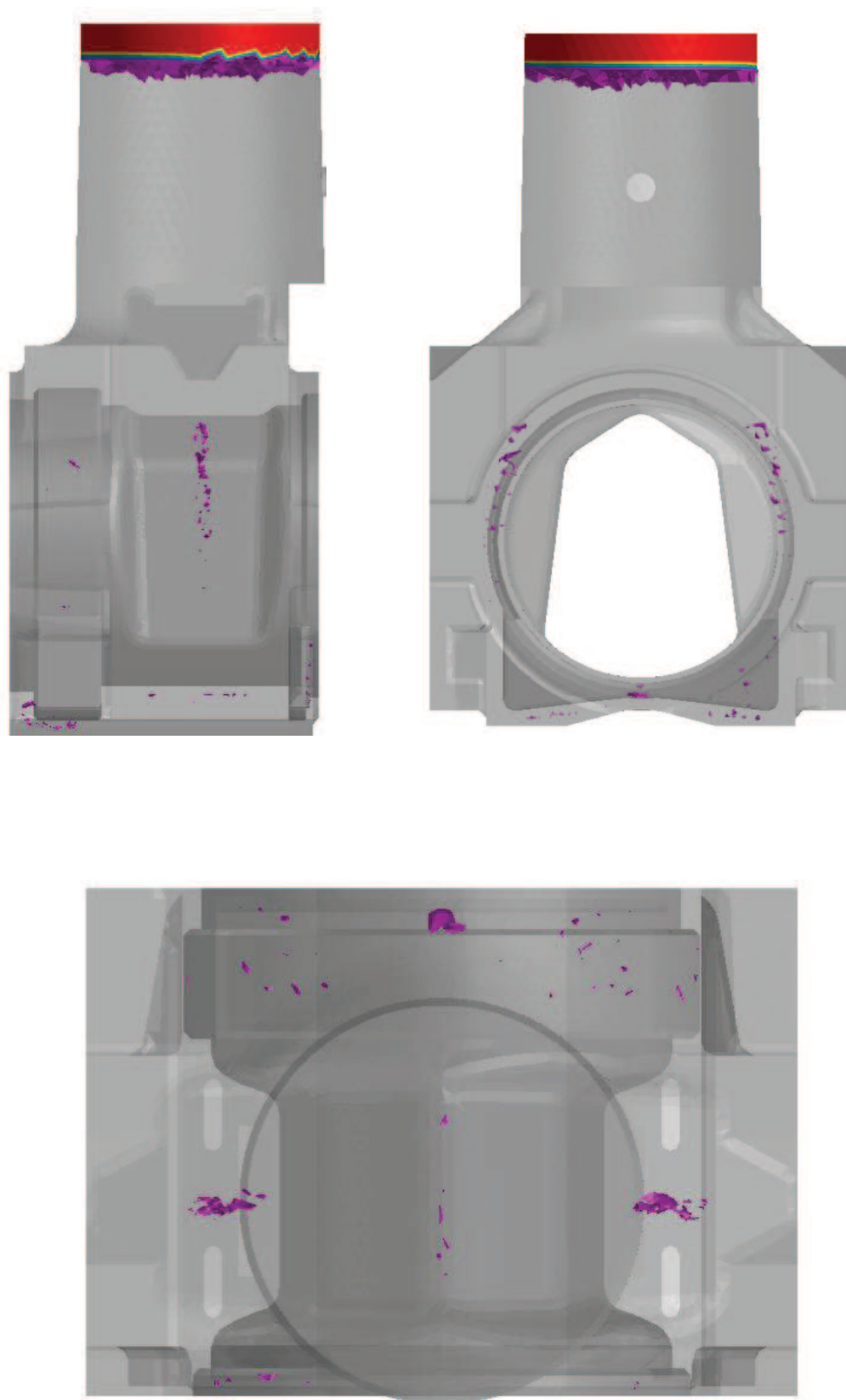


Obr. 3.5. Predikce mikrostaženin [15].

Rozložení teplotních polí po naplnění odlitku zajišťuje usměrněné tuhnutí, přestože je během plnění nejvíce prohřátá spodní část odlitku. Vrchní etáž vtoků přispívá ke konci plnění k prohřátí nálitku, tak aby nedošlo k zatuhnutí hladiny nálitku a byla zajištěna správná funkce otevřeného atmosferického nálitku [15].

Tuhnutí odlitku opět postupuje od spodní partie odlitku k nálitku, přičemž nedochází k oddělení tepelných uzlů v nálitku. Dosazovací klín je velice dlouhý a metalostatická výška nálitku již není schopna dosadit kov do mezidendritických prostor v tepelné ose tuhnutí [15].

Je nutné posílit chlazení spodní části odlitku, tak aby dosazovací klín byl více otevřený, čímž by se odstranil vznik ředin. Se zvýšením rychlosti ochlazování bude možné následně zmenšit velikost středového nálitku, tak aby se zvýšilo využití tekutého kovu [15].

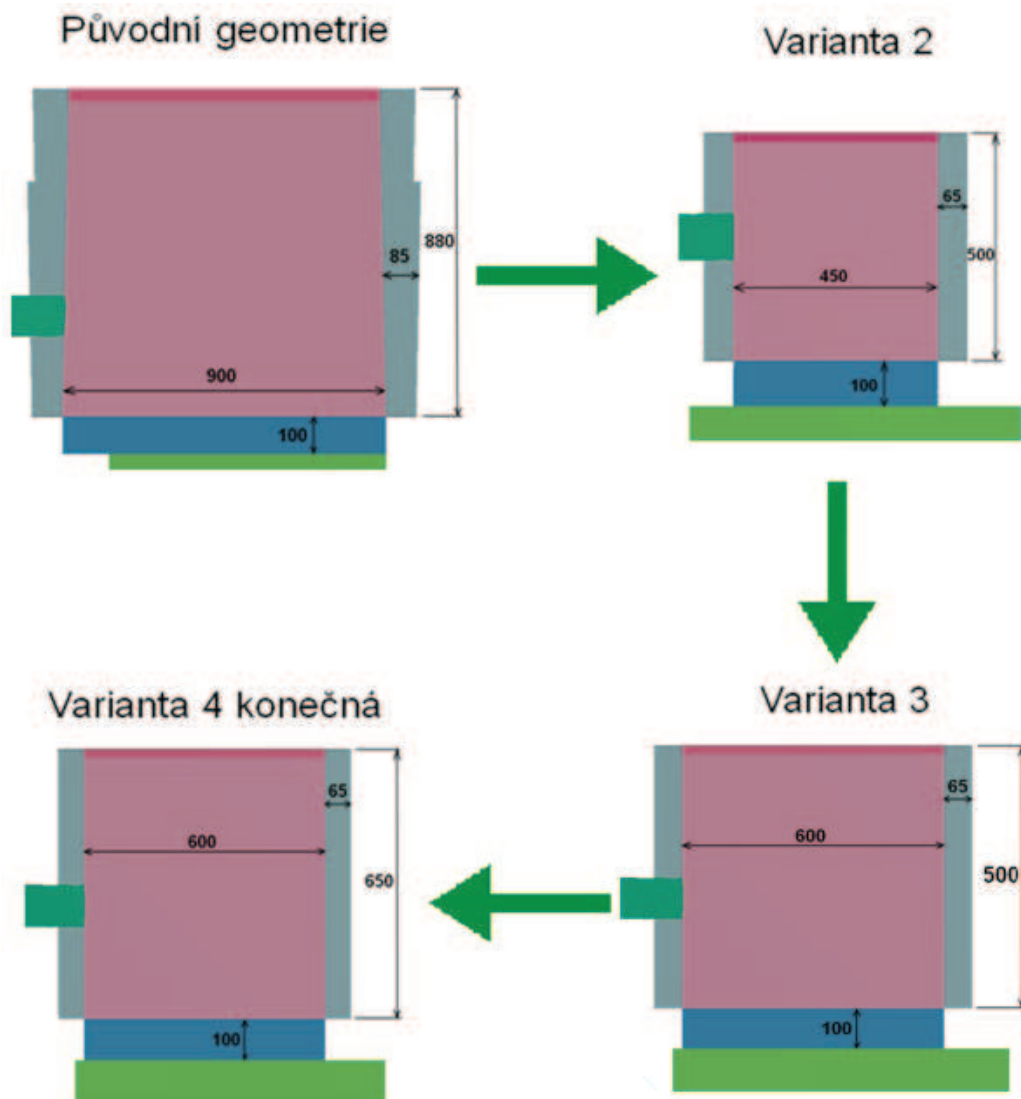


Obr. 3.6. Predikce mikrostaženin (ředin) [15].

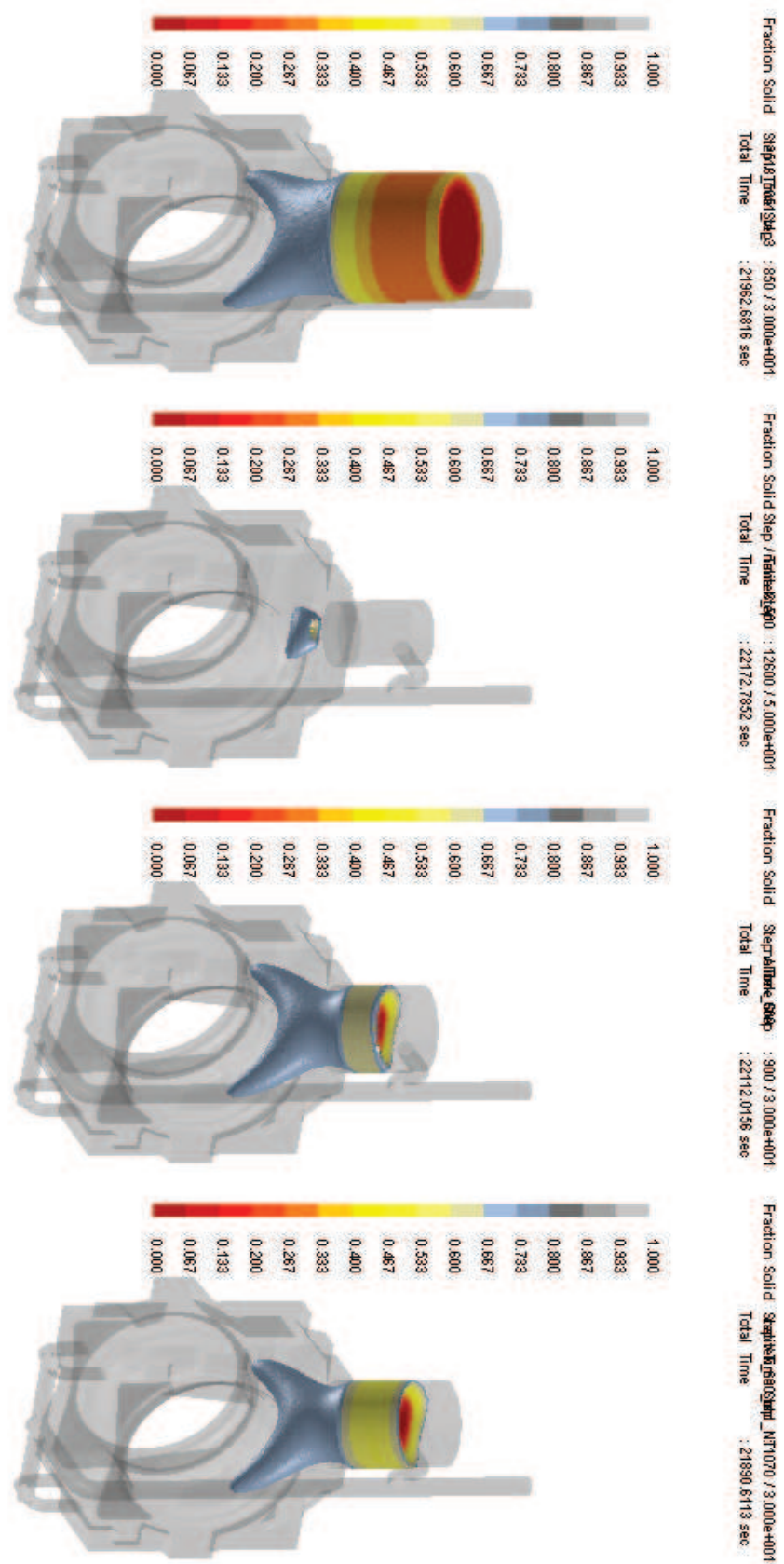
3.2. POSTUP OPTIMALIZACE SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE

Optimalizace slévárenské technologie byla provedena za účelem zvýšení využití kovu a tím docílení snížení nákladů. Zvýšení využití kovu bylo provedeno snížením objemu nálitku, při čemž bylo nutné dbát na různé faktory ovlivňující konečnou kvalitu samotného odlitku a to především způsob plnění formy, tuhnutí odlitku, vliv změny objemu nálitku na tvorbu vad a dále rozmístění a velikost chladítek, atd.

Bylo navrženo několik variant technologie s odlišnými rozměry nálitků, což je zobrazeno na obr. 3.7. Varianta 2 byla navržena se značně poddimenzovaným objemem nálitku. V tomto případě dochází k oddělení fronty tuhnutí v nálitku a odlitku a tedy i ke vzniku staženiny v odlitku viz obr. 3.8. a obr. 3.9. Proto byla zvolena větší velikost nálitku ve třetí variantě. Zvýšení objemu nálitku vedlo k vytažení staženiny do nálitku, ale kořen staženiny byl pouze v malé výšce nad konečným rozměrem odlitku. Při použití této varianty by hrozilo, že kov v okolí staženiny, který často obsahuje vysoký podíl ředin a vycezenin by se mohl dostat do podnáltkové oblasti odlitku. Ve čtvrté variantě byl ponechán průměr nálitku jako ve variantě č. 3, ale byla zvýšena jeho výška. Větší metalostatická výška nálitku může zajistit lepší dosazování do mezidendritických prostor a současně se vytahuje staženina výše do nálitku viz obr. 3.8. a obr. 3.9.

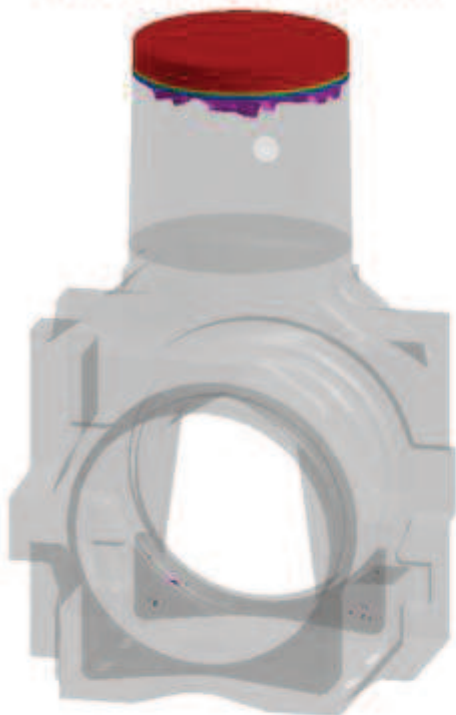


Obr. 3.7. Postup optimalizace pomocí zmenšování objemu nálitku.



Obr. 3.8. Podíl tuhé fáze při tuhnutí [16].

Původní geometrie



Varianta 2



Varianta 4 konečná



Varianta 3



Obr. 3.9. Predikce makrostaženin v navržených variantách [16].

Tab. 3.2. Porovnání jednotlivých návrhů geometrie nálitku.

| | původní geometrie | varianta 4 (nálitek 600/ výška 650 +100 krček) | varianta 2 (nálitek 450/ výška 500 +100 krček) | varianta 3 (nálitek 600/ výška 500 +100 krček) |
|---|-------------------|---|---|---|
| hrubá hmotnost odlitku | 11489 kg | 11489 kg | 11489 kg | 11489 kg |
| hmotnost vtokové soustavy, krčku a nálitku | 5121 kg | 3264 kg | 1309 kg | 1863 kg |
| surová hmotnost odlitku | 16610 kg | 14753 kg | 12798 kg | 13352 kg |
| využití kovu | 69% | 78% | 90% | 86% |
| hmotnost chladítek | 453 kg | 878 kg | 453 kg | 453 kg |

Současně s velikostí nálitku byla v jednotlivých variantách optimalizována poloha a velikost chladítek ve spodní části odlitku. Bez zvýšení podílu chladítek by nebylo možné takovým způsobem zmenšit velikost nálitku.

Podle 4. varianty bylo ve slévárně Žďas, a.s. provedeno odlití zkušební odlitku. Navržená varianta vykazuje podle numerické simulace poměrně nízký výskyt vad a současně dosahuje o 9% vyšší využití kovu, než u původní geometrie nálitku.

4. POPIS EXPERIMENTU

V průběhu odlévání a následného tuhnutí odlitku ložiska bylo provedeno měření teplotního pole odlitku a formy. Po otryskání a tepelném zpracování odlitku se následně provedly další zkoušky pro posouzení přínosů navržené technologie (nedestruktivní kontrola, detekce a analýza vad, analýza vlastností kovu v nálitku a ve vybraných částech odlitku apod.).

4.1. VEDENÍ TAVBY

Tavení probíhalo na zásadité EOP. Hmotnost tavby činila 15,8t. Po ukončení oxidace byl kov transportován na pánvovou pec pro další zpracování. Cílem bylo dosáhnout obsahu síry cca 0,01, provést modifikaci plněným profilem FeSiCa. Nižší obsah síry měl podle předpokladů vést k potlačení vzniku vycezenin. Použitím modifikace oceli vápníkem se sledovalo zvýšení houževnatosti oceli, čímž by se také mohl snížit případný výskyt vad v podnálítkové oblasti po upálení nálitku. Výsledek analýzy chemického složení kovu z pece je uveden v tab. 4.1. Vzorek po modifikaci obsahoval pouze 10ppm Ca. Teplota na konci zpracování v LF činila 1564 °C [14].

Tab. 4.1. Chemické složení vzorku odebraného z LF v hmotnostních procentech [14].

| C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Cu | Al |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 0,20 | 1,36 | 0,39 | 0,008 | 0,005 | 0,19 | 0,16 | 0,14 | 0,022 |

4.2. ODLÉVÁNÍ

Odlévání probíhalo z pánve se spodní výpustí (šoupátkový uzávěr) po odlití cca 500kg do kokily. Prostoj mezi LF a odléváním byl přibližně 10 min. Při poklesu max. cca 1°C/min lze očekávat, že se lící teplota pohybovala v intervalu 1555-1560°C (v simulaci uvažováno 1565°C). Doba lití činila od začátku lití do úplného naplnění odlitku a nálitku cca 150 s [14].

Při lití došlo k přelití nálitku nad izolační tvárnice v nálitku, čímž došlo ke změně tuhnutí kovu v odlitku a zejména nálitku.

4.3. PLNĚNÍ DUTINY FORMY

Pro sledování charakteru plnění dutiny formy kovem bylo použito dvou kamer umístěných v dělicí rovině odlitku a v nálitku formy. Při sledování byly získány dva video soubory průběhu lití a také z něj byla odečtena doba lití [14].



Obr. 4.1. Pohled kamery do dutiny formy přes náletek.

Na obr. 4.1. je patrné spojení jednotlivých sekcí-ramen odlitku v čase cca 120 s po začátku lití. Na hladině jsou jasně viditelné částice sekundární strusky.



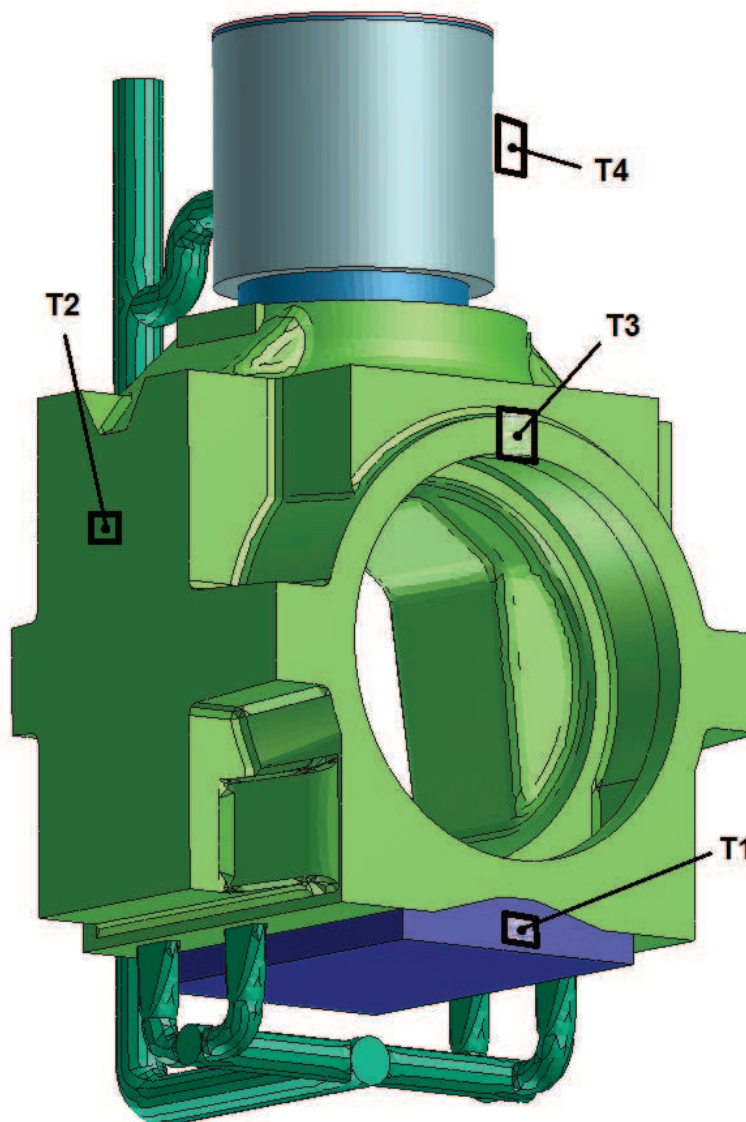
Obr. 4.2. Přelití nálitku na konci lití.

5. MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ ODLITKU

Měření teplotního pole odlitku a formy bylo provedeno z důvodu dalšího porovnání skutečných teplotních křivek a křivek získaných na základě výpočtu pomocí numerické simulace. V případě neshody je pak možné provést i verifikaci výsledků na základě inverzních simulací.

Při měření bylo použito 5ks termočlánků. Jednalo se o jeden typ termočlánku typu S (Pt-PtRh10) umístěném v kovu a 4 kusů termočlánku typu K (NiCr-Ni) umístěných ve formě. Místo uložení jednotlivých termočlánků je zřejmé z obr. 5.1.

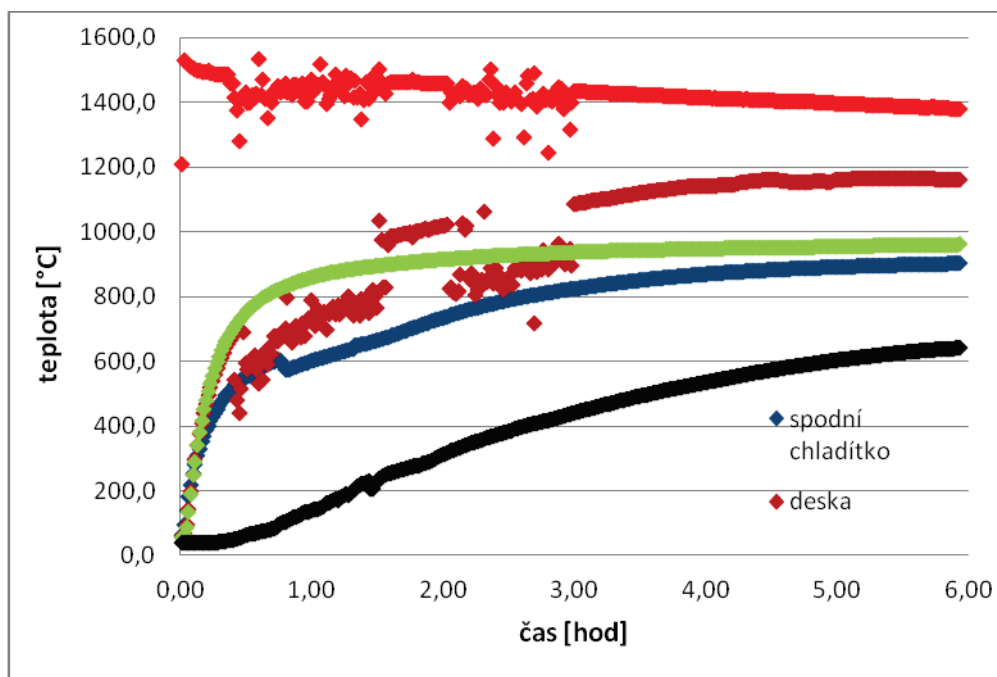
Termočlánky typu K (měření ve formě) byly označeny čísly 1 – 4. Termočlánek č. 1 byl umístěn ve spodním chladítku v polovině jeho výšky i šířky. Pro zajištění přesné polohy termočlánku byl do chladítka vyvrtán otvor o délce 20 mm, do kterého byl následně při formování uložen termočlánek. Termočlánek č. 2 byl uložen ve směsi cca 2 cm od středu boční stěny. Toto místo reprezentuje masivnější oblast odlitku a tedy i místo, kde byl očekáván intenzivnější přestup tepla. Termočlánek č. 3 byl uložen ve směsi cca 2 cm od příruby v geometrické ose odlitku. Pro kontrolu funkčnosti tepelné izolace nálitku byl termočlánek č. 4 umístěn cca 2 cm za tepelnou izolaci přibližně v polovině výšky nálitku [14].



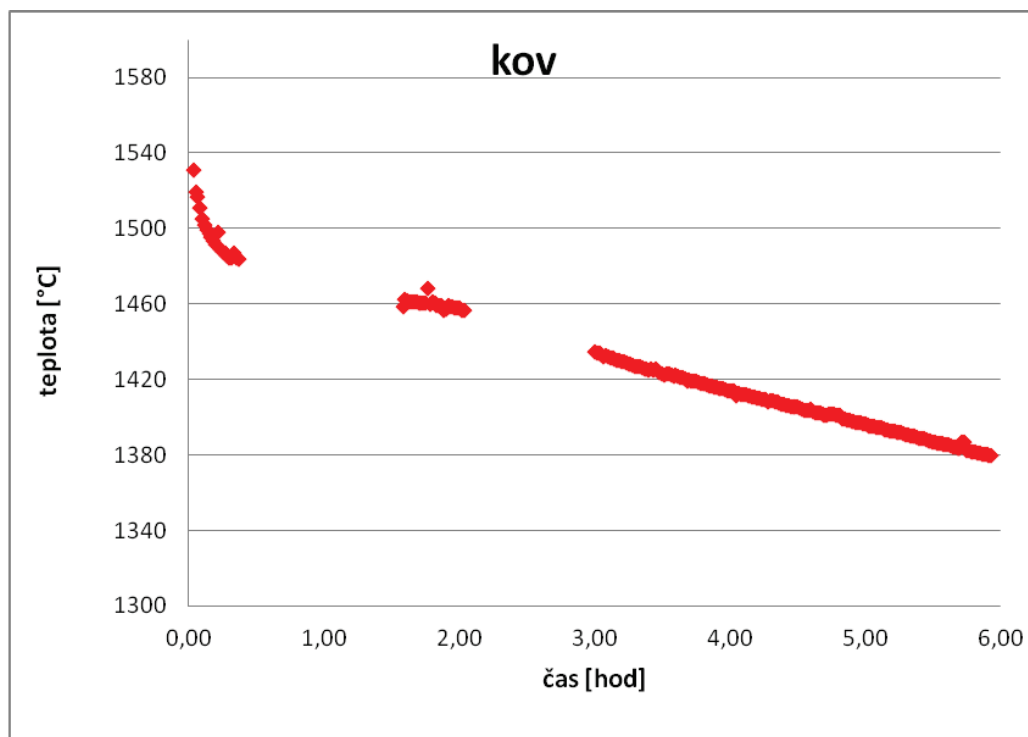
Obr. 5.1. Poloha jednotlivých termočlánků

5.1. NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Výsledky měření teplotního pole odlitku a formy jsou zobrazeny na obr. 5.2. Z výsledků je zřejmé, že během měření došlo k rozkolísání signálu termočlánku umístěného v kovu a termočlánku ve formě u desky a to ve stejném časovém úseku. Záznam bez chybových měření v kovu je uveden na obr. 5.3. a ve formě na obr. 5.4. [14].

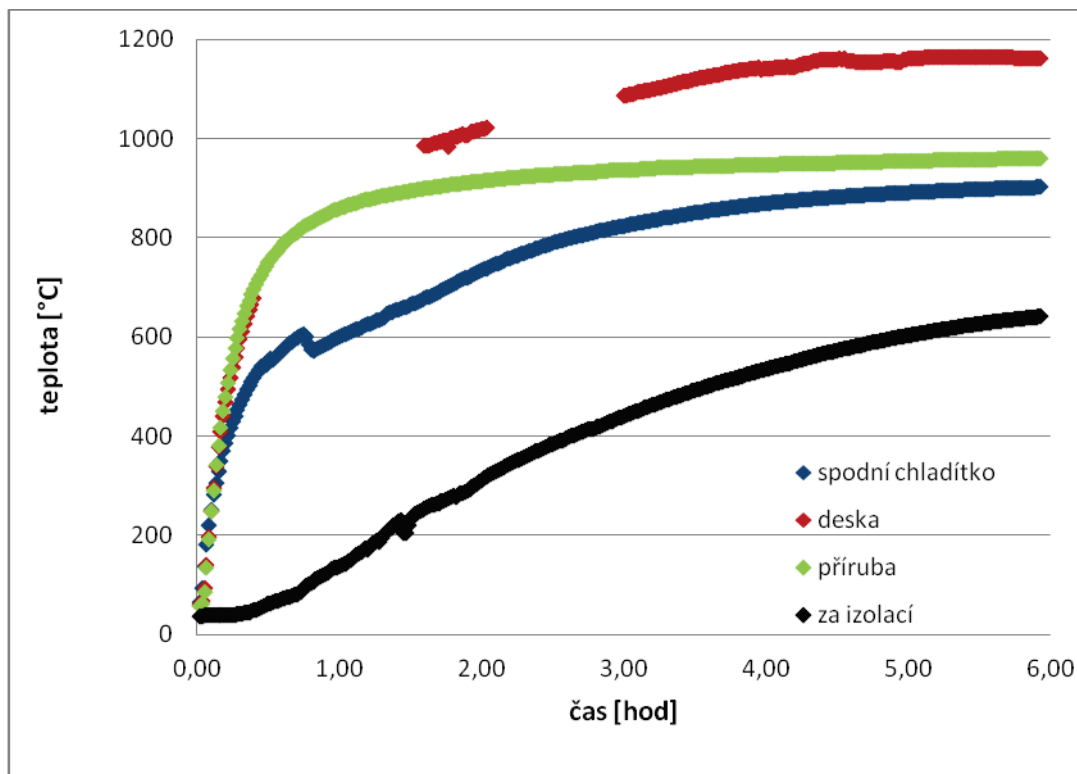


Obr. 5.2. Teplotní pole odlitku formy [14].



Obr. 5.3. Teplotní pole v odlitku (kovu) [14].

Nejvyšší naměřená teplota v odlitku činila 1531 °C po další minutě již byla hodnota teploty cca 1520 °C. Začátek tuhnutí v měřeném místě byl již po 4 minutách po odlití. Naměřená teplota v kovu po cca 6 hodinách byla 1379 °C [14].



Obr. 5. 4. Teplotní pole formy [14].

Jak vyplývá z průběhu teplotních křivek, ve formě byl v první fázi náběh teplot v oblasti příruby a desky totožný. S rostoucím časem docházelo k většímu tepelnému zatížení formy v oblasti masivnější části odlitku – desky, kde dosahovala teplota na konci měření 1160 °C. Teplota ve směsi u příruby byla o 200 °C nižší. [14]

Modrá křivka zachycující teplotu v kontaktním chladítku vykazuje při teplotě cca 600 °C po 45 minutách rekalescenci, která souvisí s transformací materiálu chladítka v kontaktu s odlitkem. Z toho lze usuzovat, že teplota v místě styku po 45 min je v oblasti transformačních eutektoidních teplot. Teplota za tepelnou izolací nálitku postupně roste a po 6 hodinách je cca 640 °C. Přehled naměřených teplot pro měřená místa je uveden v tab. 5. 1. [14].

Tab. 5. 1. Teploty naměřené na konci měření u odlitku ložiska šest hodin po odlití [14].

| místo | spodní chladítko | deska | příruba | za izolací | kov |
|--------------|------------------|-------|---------|------------|------|
| teplota [°C] | 902 | 1160 | 960 | 641 | 1379 |

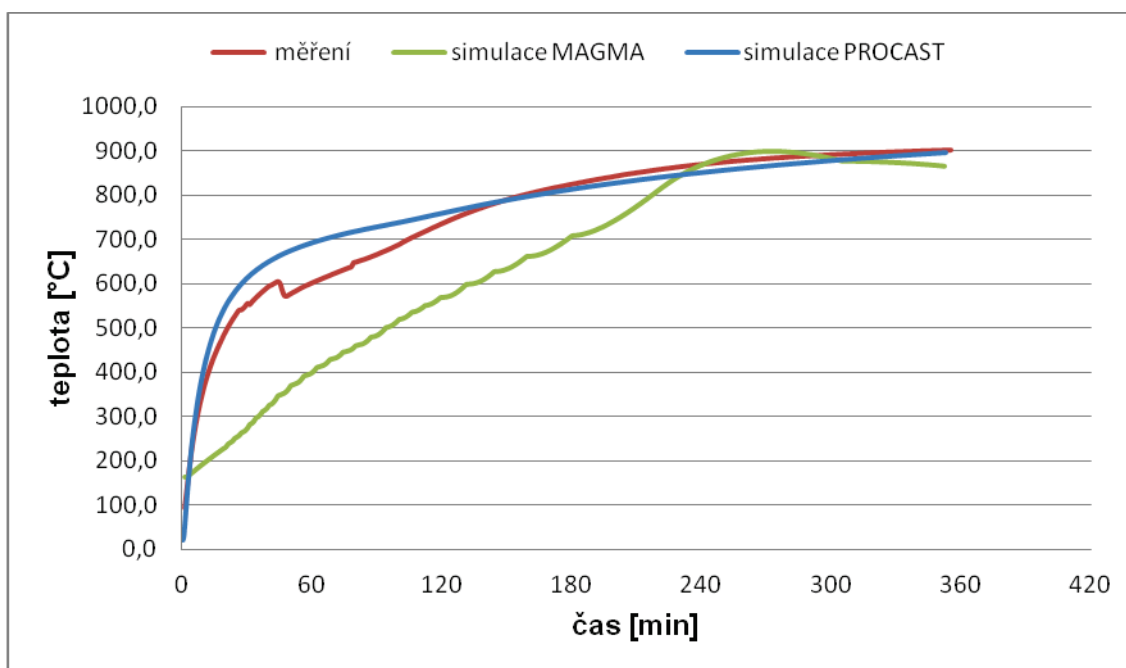
5.2. POROVNÁNÍ SKUTEČNÝCH TEPLOTNÍCH KŘIVEK A KŘIVEK VYPOČTENÝCH NUMERICKOU SIMULACÍ

Simulace byly provedeny ve dvou simulačních programech a to v programu PROCAST a MAGMA. Průběh teplot stanovený v programu Procast je v grafech vyjádřen vždy modrou křivkou a v programu Magma zelenou křivkou.

Jelikož došlo v průběhu odlévání k přelití nálitku, které ovlivnilo tuhnutí odlitku i nálitku, byly proto provedeny nové výpočty v obou použitých programech, které uvažují toto přelití. Naměřené teplotní křivky slouží k ověření správnosti a přesnosti výpočtů v simulačním programu, který byl použit k návrhu změn technologického postupu.

Na obr. 5.5. jsou uvedeny výsledky simulovaných teplot na spodním chladítku včetně teplotní křivky naměřené termočlánkem ve spodním chladítku. Z obr. 5.5. je zřejmá velice dobrá shoda mezi výpočtem provedeným programem Procast a skutečným stavem. Přibližně v 10. minutě dochází k mírnému odchýlení těchto křivek, což by mohlo být způsobeno neuvážením rekalescence kovu programem Procast. Od cca 140. minuty se křivky v podstatě překrývají a jejich hodnota je na konci měření naprosto stejná (902°C).

Z obr. 5.5. je znatelný rozdílný průběh mezi křivkou, vypočtenou programem Magma a skutečným stavem. Jejich odchylka se v čase snižuje a v cca 250. minutě skoro zaniká. Vypočtená teplota na konci měření byla o 35° C nižší, než reálná hodnota.

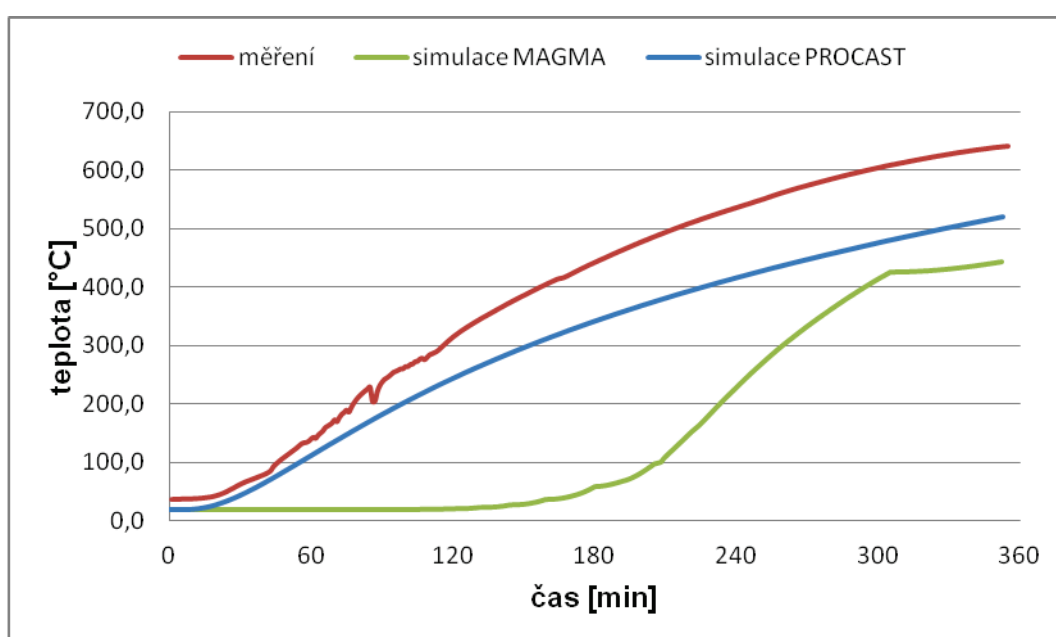


Obr. 5.5. Porovnání simulovaných a reálných teplotních křivek naměřených ve spodním chladítku.

Teplotní křivka vypočtená ve směsi 2 cm za izolací pomocí programu Procast (obr. 5.6.) má podobný průběh, jako křivka naměřená v tomto místě termočlánkem. Vypočtená křivka vykazuje s rostoucím časem narůstající odchylku od křivky naměřených teplot. Teplota vypočtená v programu Procast 360 minut po odlití je o

121 °C nižší, než teplota naměřená termočlánkem za izolací. To by ukazovalo na skutečnost, že byly při výpočtu v programu Procast uvažovány lepší izolační schopnosti než mají reálné izolační směsi.

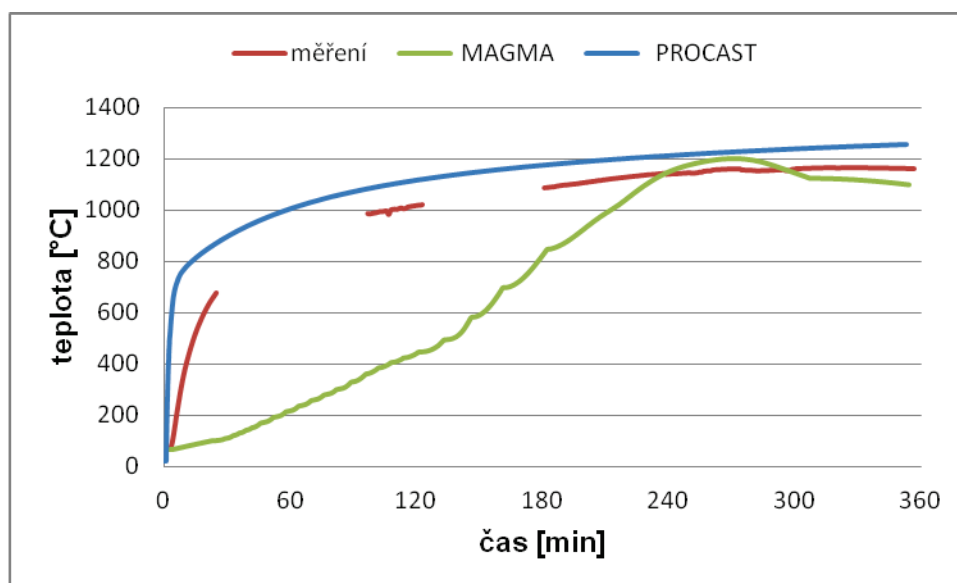
Charakter křivky vypočtené za izolací programem Magma (obr. 5.6.) je naprosto odlišný od průběhu křivky reálných teplot. Na konci měření (360. minuta) je teplota vypočtená v programu Magma o 196 °C nižší, než teplota naměřená termočlánkem za izolací.



Obr. 5.6. Porovnání simulovaných a reálných teplotních křivek naměřených za izolací.

Teplotní křivka vypočtená programem Procast ve formovací směsi 2cm za deskou (obr. 5.7.) má ze začátku prudký vzestup a podobný průběh jako křivka naměřená v tomto místě termočlánkem. Vypočtená teplota je na konci měření o 97° C vyšší, než teplota reálná.

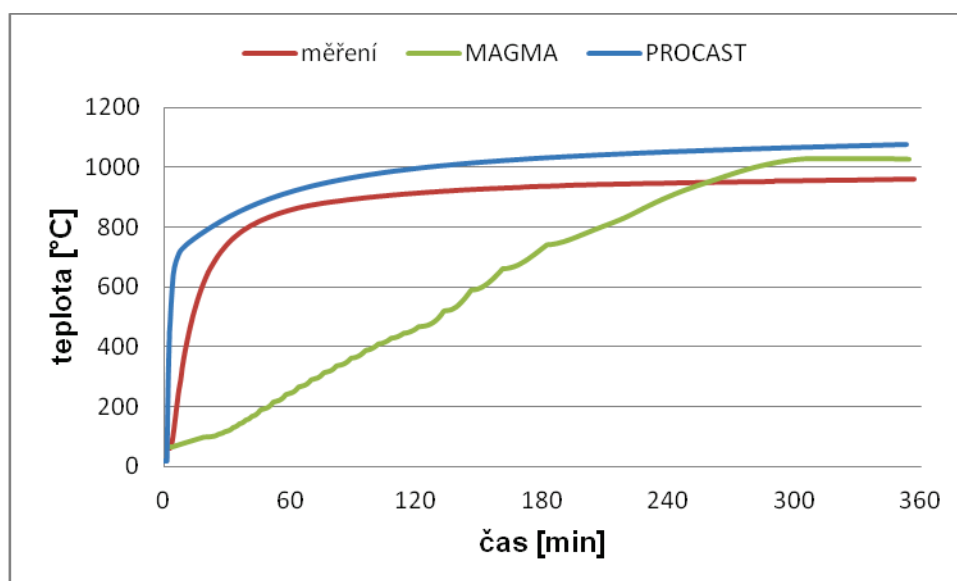
Výpočet teplotní křivky 2cm za deskou provedený programem Magma (obr. 5.7.) má opět zcela odlišný průběh od reálných hodnot teplot naměřených termočlánkem ve stejném místě. Na konci měření je naměřená teplota v dobré shodě s reálně naměřenou teplotou.



Obr. 5.7. Porovnání simulovaných a reálných teplotních křivek naměřených za deskou.

Průběh teplotní křivky vypočtené programem Procast ve směsi 2cm za přírubou (obr. 5.8.) má prudký vzestupný trend a podobný průběh jako teplotní křivka stanovená měřením v tomto místě. Hodnota teploty vypočtená programem Procast je o 115° C vyšší, než skutečná hodnota teploty.

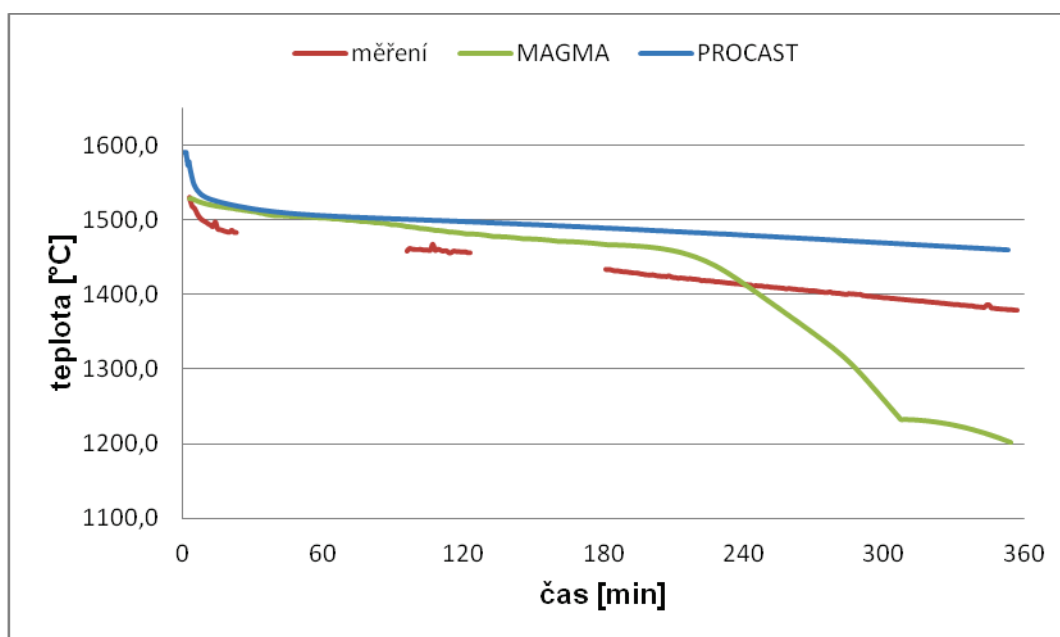
Teplotní křivka vypočtená programem Magma ve formovací směsi 2cm za přírubou (obr. 5.8.) má zcela odlišný průběh od teplotní křivky naměřené ve stejném místě. Velikost odchylky je na konci měření však celkově nižší než odchylka stanovená v programu Procast.



Obr. 5.8. Porovnání simulovaných a reálných teplotních křivek naměřených za přírubou.

Teplotní křivka vypočtená v kovu programem Procast (obr. 5.9.) má po celou dobu měření podobný charakter jako teplotní křivka naměřená v tomto místě termočlánkem. Hodnota teploty kovu vypočtená programem Procast na konci měření je o 80 °C vyšší, než reálná hodnota teploty kovu v tomto čase.

Trend teplotní křivky pro kov vypočtené programem Magma (obr. 5.9.) vykazuje do cca 230. minuty podobný průběh jako reálná teplotní křivka naměřená v kovu. V čase cca 230 minut dojde k prudkému poklesu vypočtené teploty. Rychlý pokles teploty charakterizuje stav, že v daném místě odlitku došlo k jeho ztuhnutí, což však neodpovídá reálnému stavu.



Obr. 5.9. Porovnání simulovaných a reálných teplotních křivek naměřených v kovu.

5.3. POROVNÁNÍ HODNOT VYPOČTENÝCH V PROGRAMU PROCAST S REÁLNÝMI NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI

Křivka vypočtená na spodním chladítku vykazuje velmi dobrou shodu s křivkou reálných teplot v tomto místě. Odchylka v rozmezí cca 10. až 140. minuty by mohla být dána vlivem neuvážení rekalescence kovu numerickou simulací.

Simulace provedená za izolací vykazuje odchylku od reality, což by mohlo být způsobeno neuvážením změny termofyzikálních vlastností izolačního materiálu. S rostoucí teplotou dochází ke snižování pórovitosti izolačního materiálu a tím ke snížení izolační účinnosti. Tento jev není programem Procast ve výpočtu uvažován.

Vypočtené hodnoty teploty kovu jsou o cca 80 °C vyšší, než reálné naměřené hodnoty teplot. Tato odchylka by mohla být způsobena uvážením lepší izolační schopnosti izolace nálitku a tím nižšího odvodu tepla v numerické simulaci. Vyšší hodnoty vypočtených teplot ve formovací směsi za deskou a přírubou by rovněž mohly být dány vyšší izolační schopností izolace nálitku. Čímž by mohlo dojít k většímu odvodu tepla do formovací směsi.

Numerická simulace vykazuje pouze mírné odchylky od reálných teplot. Trendové průběhy vypočtených a naměřených teplot zcela odpovídají, ale je možné zvážit verifikaci termo-fyzikálních vlastností tak, aby bylo dosaženo lepší shody se skutečností.

Výsledky simulací jsou srovnatelné s reálnými hodnotami, a tedy optimalizace technologie výroby odlitku ložiska byla provedena na základě dostatečně přesných vstupních hodnot termofyzikálních parametrů jednotlivých používaných materiálů. Jedinou významnější oblastí, kterou by bylo možné se dále zabývat, je analýza příčiny vzniku odchylky mezi vypočtenou a naměřenou teplotou v kovu.

5.4. POROVNÁNÍ HODNOT VYPOČTENÝCH POMOCÍ PROGRAMU MAGMA S REÁLNÝMI NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI

Simulace chladnutí a tuhnutí v Programu Magma byla provedena pracovníky firmy Žďas a.s. Použité počáteční podmínky byly totožné s hodnotami použitými v programu Procast. Každý z těchto programů však pracuje s jinou databází termofyzikálních parametrů používaných při výpočtu. Z tohoto důvodu lze očekávat i odchylky mezi výsledky simulací získaných z jednotlivých simulačních programů.

V případě výsledků z programu Magma jsou výsledky vypočtených teplot v místě měřené termočlánekem na konci měření ve většině případů v dobré shodě s reálným stavem. Charakter teplotních křivek stanovený v programu Magma však vykazuje v počátku chladnutí a tuhnutí odlitku velké rozdíly vůči teplotním křivkám naměřených pomocí termočláneků v příslušných místech. To má za následek, že množství tepla odvedené formou v počátku chladnutí a tuhnutí je jiné než v reálném případě, což může ovlivnit i celkovou přesnost výpočtu, jak je to zřejmé i z teplotní křivky v kovu.

Doporučuji se proto zaměřit na další verifikaci termofyzikálních parametrů, které program Magma při výpočtu uvažuje.

6.1. ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Ke zjištění mechanických vlastností materiálu zkušebního odlitku byly provedeny následující zkoušky:

- tahová zkouška ze vzorků z oblasti přilitého klínu
- tahová zkouška ze vzorků z oblasti nálitku
- zkouška vrubové houževnatosti ze vzorků z přilitého klínu

Tahová zkouška a zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na vzorcích z oblasti přilitého klínu a slouží k porovnání hodnot mechanických vlastností materiálu zkušebního odlitku s požadavky zákazníka na mechanické vlastnosti. Vzorky byly odebrány po normalizačním žitání (za teploty 910°C) a popouštění (za teploty 650°C). Mechanické hodnoty požadované zákazníkem při teplotě 20° C jsou uvedeny v tab. 6. 2. Z nich vyplývá, že jsou vyžadovány pevnostní charakteristiky a minimální hodnota nárazové práce. Zákazník slévárny Žďas a.s. pro nějž jsou odlitky z této jakosti oceli vyráběny, nevyžaduje minimální hodnotu tažnosti, příp. kontrakce.

Tab. 6.2. Hodnoty mechanických vlastností v oblasti přilitého klínu požadované zákazníkem při teplotě 20° C.

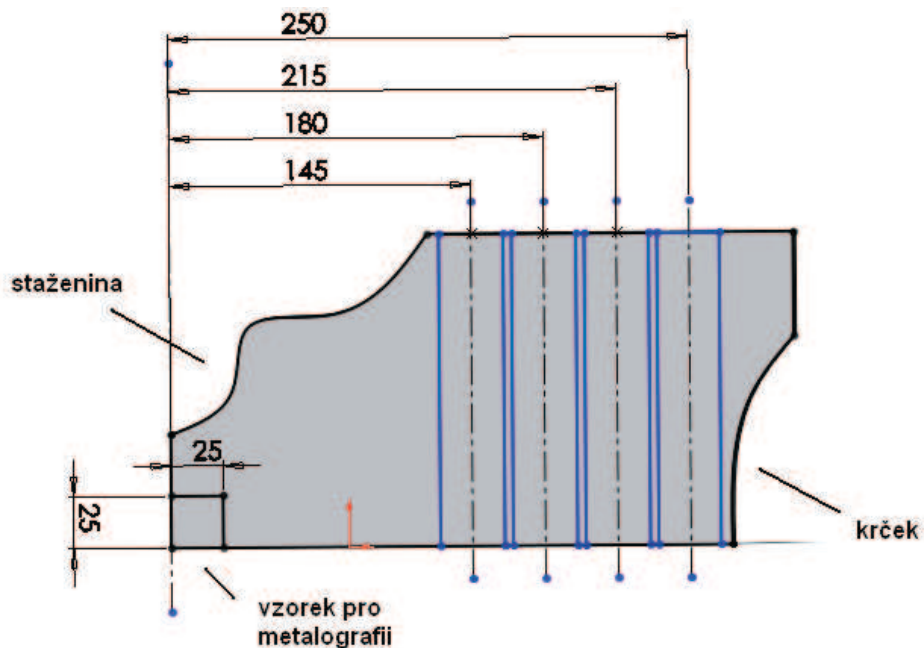
| | mez pevnosti v tahu [MPa] | mez pevnosti v kluzu [MPa] | tažnost A ₅ [%] | nárazová práce KV [J/cm ⁻²] |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| požadovaná hodnota | 500 ÷ 650 | min. 240 | nedefinováno | min. 27 |

Hodnoty mechanických vlastností naměřené na přilitém klínu jsou uvedeny v tab. 6.3. Všechny naměřené hodnoty mechanických vlastností (tab. 6.3.) vyhovují požadovaným hodnotám (tab. 6.2.). Zákazník nemá specifické požadavky na hodnotu tažnosti. Nejnižší hodnota tažnosti je dle normy pro zkoušený (tab. 6.1.) materiál 20%, které materiál vyhovuje. Hodnoty vrubové houževnatosti stanovené z přilitého klínu jsou čtyřnásobně vyšší, než je minimální požadavek normy.

Tab. 6.3. Hodnoty mechanických vlastností získaných z přilitého klínu při teplotě 20°C.

| vzorek č. | Mez kluzu Re [MPa] | Pevnost Rm [MPa] | Tažnost A ₅ [%] | Kontrakce Z [%] | Nárazová práce KV [J/cm ⁻²] |
|-----------|--------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|--|
| 58C | 337 | 540 | 29 | 68,6 | 119 100 125 |

K posouzení vlivu chemické heterogenity v odlitku na mechanické vlastnosti byly provedeny tahové zkoušky z oblasti nálitku. Tato oblast byla vybrána vzhledem k nejdelší době tuhnutí odlitku. Po odřezání nálitku plamenem se pomocí pásové pily náletek rozřezal podle rozřezového plánu na 4 pásy o rozměrech 25x25x120mm. Poloha pásů je znatelná z obr. 6.1. Z těchto pásů byly zhotoveny 4 zkušební tyče pro tahovou zkoušku.



Obr. 6.1. Rozřezový plán vzorků.

Vzorky pro tahovou zkoušku z oblasti nálitku byly označeny jako č.1 až č.4. Vzdálenost odběru jednotlivých vzorků od osy nálitku je uvedena v tab. 6.4.

Tab. 6.4. Vzdálenost zkušebních tyčí od tepelné osy nálitku.

| vzorek č. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| vzdálenost [mm] | 250 | 215 | 180 | 145 |

Všechny hodnoty mechanických vlastností určených tahovou zkouškou z oblasti nálitku (tab. 6.5.) odpovídají požadavkům zákazníka na mechanické vlastnosti.

Tab. 6.5. Hodnoty mechanických vlastností získaných pomocí tahové zkoušky z nálitku.

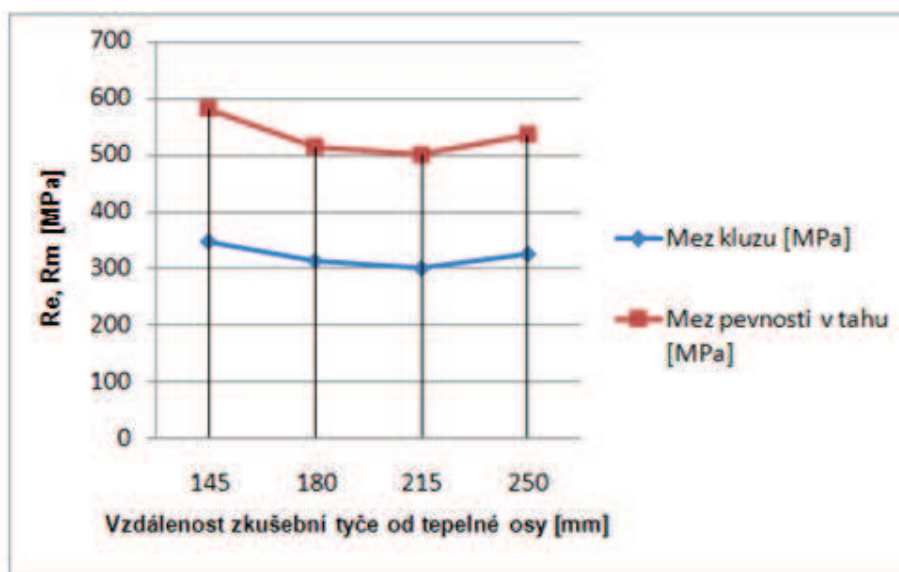
| Vzorek č. | Mez kluzu Re [MPa] | Mez pevnosti v tahu Rm [MPa] | Tažnost A ₅ [%] | Kontrakce Z [%] |
|-----------|--------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | 326 | 536 | 22,4 | 48,2 |
| 2 | 301 | 501 | 19,4 | 42,2 |
| 3 | 314 | 515 | 22,0 | 43,8 |
| 4 | 348 | 582 | 17,0 | 24,3 |

Rozdílné hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu ve vzorcích č. 1. až č. 4. Mohou souviset s obsah uhlíku. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku, dochází v ocelích k zvyšování meze pevnosti v tahu a meze kluzu a současně z poklesu tažnosti a kontrakce. Obsah uhlíku ve vzorcích byl analyzován z hlavy zkušebního vzorku. Jak je zřejmé z jeho obsahů uvedených v tab. 6.6. korelují vyšší hodnoty pevnosti a meze kluzu s vyšším obsahem uhlíku.

Tab. 6.6. Obsah uhlíku v jednotlivých vzorcích v hmotnostních procentech.

| vzorek č. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------|------|------|------|------|
| C [%] | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 0,23 |

Závislost mechanických vlastností stanovených při tahové zkoušce je graficky vyjádřena na obr. 6.2. Je zde uvedena mez pevnosti a mez kluzu v závislosti na poloze vzorku v nálitku.



Obr. 6.2. Závislost mechanických vlastností na vzdálenosti od tepelné osy.

6.2. CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Analýza chemického složení byla provedena na vzorcích odebraných:

- Z kovu v pánvové peci po závěrečné dezoxidaci.
- Ze zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku (hlava zkušební tyčky).
- Ze vzorku z tepelné osy odlitku.

Chemické složení oceli požadované v normě je uvedeno v tab. 6.7. Jedná se o nelegeovanou ocel GS20Mn5. Podle obsahu Mn by bylo možné podle dřívějších zvyklostí považovat tuto ocel za nízkolegovanou Mn (obsah Mn větší než 1,2%). Podle současných pravidel je považována za nelegeovanou.

Tab. 6.7. Chemické složení oceli GS 20Mn5 dle normy ČSN 42 2712.

| C | Mn | Si | P | S |
|-------------|------------|-------------|-------|-------|
| 0,17 – 0,25 | 0,9 – 1,40 | 0,20 – 0,40 | 0,040 | 0,040 |

Slévárna Žďas a.s. měla vytvořený pro tuto jakost ocelí a experimentální odlitek vnitřní předpis, který vymezuje rozmezí koncentrací pro vybrané prvky.

Tab. 6.8. Předpis chemického složení po dezoxidaci hliníkem a modifikaci vápníkem ve slévárně Žďas a.s.

| prvek | C [%] | Al [%] | S [%] | P [%] |
|--------------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| požadovaná hodnota | max. 0,230 | 0,0150 -0,0250 | max. 0,0050 | max. 0,0100 |

Chemické složení vzorku odebraného po závěrečné dezoxidaci je uvedeno v tab. 6.9. Jedná se o vzorek odebraný z pánvové pece před litím. Obsahy všech prvků (tab. 6.9) vyhovují normě (tab 6.7) a také předpisu slévárny Žďas a.s. (tab. 6.8.). Podle požadavků měla být ocel modifikována a obsah Ca se měl pohybovat v rozmezí 30 – 40 ppm. Hodnota vápníku ve vzorku činila pouze 10 ppm. Takto nízký obsah Ca však nezaručuje dostatečnou modifikaci oceli.

Tab. 6.9. Chemické složení vzorku odebraného z pánvové pece po dezoxidaci a modifikaci.

| C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Cu | Al |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 0,20 | 1,36 | 0,39 | 0,008 | 0,005 | 0,19 | 0,16 | 0,14 | 0,022 |

Výsledky analýzy chemického složení vzorků odebraných z nálitku (hlava zkušební tyče) jsou uvedeny v tabulce 6.10. Jako vzorky pro analýzu z oblasti nálitku posloužily přetrhnuté zkušební tyče pro tahovou zkoušku z též oblasti. Jejich umístění je na obr. 6.1. a jejich vzdálenost od tepelné osy je uvedena v tab. 6.11. U těchto vzorků byla pozorována segregace prvků do nálitku, jakožto poslední oblasti tuhnutí.

Tab. 6.10. Hodnoty pozorovaných prvků získané z nálitku v hmotnostních procentech.

| vzorek č. | C [%] | P [%] | S [%] | Al [%] |
|-----------|------------|--------------|--------------|--------|
| 1 | 0,21 | 0,008 | 0,006 | 0,011 |
| 2 | 0,18 | 0,008 | 0,005 | 0,018 |
| 3 | 0,18 | 0,007 | 0,005 | 0,019 |
| 4 | 0,23 | 0,007 | 0,005 | 0,019 |
| 5 | 0,33±0,39* | 0,009±0,015* | 0,004±0,008* | 0,015 |

Tab. 6.11. Vzdálenost jednotlivých vzorků od tepelné osy.

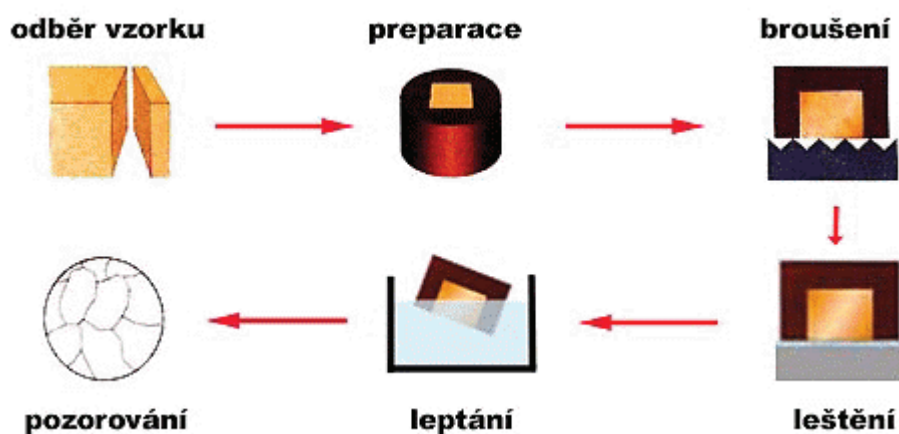
| vzorek č. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|---|
| Vzdálenost [mm] | 250 | 215 | 180 | 145 | 0 |

Vzorky pro chemickou analýzu č. 1 až č. 4 jsou zhotoveny ze závitových hlav zkušebních tyčí. Vzorek č. 5 je odebrán z místa tepelné osy těsně pod staženinou. Tento vzorek byl vysoce pórovitý a vykazoval heterogenitu chemického složení, což je ovlivněno výskytem staženiny zasahující až do odlitku.

Vzorky č. 1 až č. 4 vyhovují (vyjma Al u vzorku č. 1) interním předpisům a normě pro tento materiál. Na vzorku č. 5 je možné pozorovat segregaci prvků směrem k tepelné ose.

6.3. METALOGRAFIE

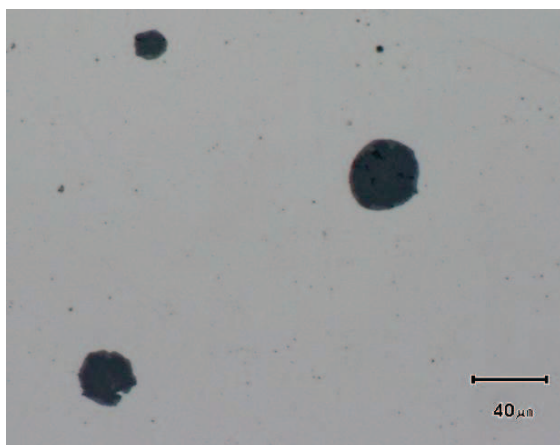
Cílem metalografie bylo vyhodnotit strukturu materiálu nálitku a případné strukturní vady. K hodnocení metalografie byly použity vzorky zhotovené z hlav zkušebních tyčí a dále vzorek odebraný z tepelné osy pod staženinou. Jejich poloha je znázorněna na obr. 6.1. a vzdálenost vůči tepelné ose je uvedena v tab. 6.11. Hodnocení vzorků proběhlo na optickém mikroskopu. Na obr. 6.3. je schematicky znázorněn postup přípravy metalografických vzorků.



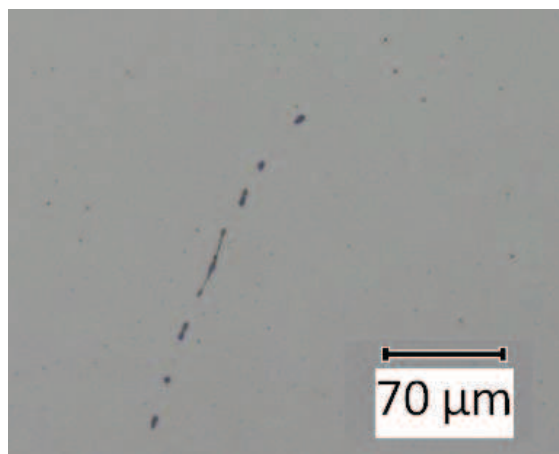
Obr. 6.3. Postup přípravy vzorků pro metalografii. [18]

Vzorek č. 1 má feriticko – perlitickou strukturu. Struktura obsahuje vměstky II. a III. typu.

Na obr. 6.4. jsou ve struktuře viditelné vměstky III. typu, které dosahují velikosti až cca 40 μm . Většina vměstků III. typu ve struktuře tohoto vzorku má globulární tvar. Jak již bylo uvedeno v kap. 2.1.5 vměstky III. typu, jsou tvořeny sulfidy manganu obsahující někdy oxidické jádro oxidu hlinitého, a vyznačují polygonálním hranatým tvarem náhodně rozložené v základní kovové hmotě. V případě delší doby tuhnutí dochází k zaoblování hran vměstků. Vzhled pak může být podobný tvaru uvedenému na obr. 6.4. Na obr. 6.5 jsou zobrazeny vměstky MnS II. typu, jejich četnost v celkové ploše vzorku nebyla příliš vysoká.

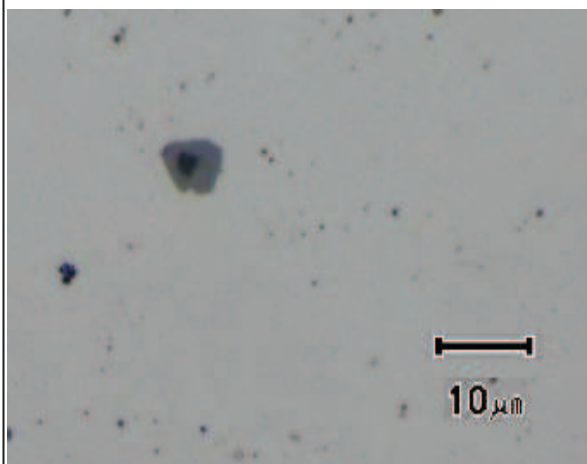


Obr. 6.4. vzorek č. 1
neleptaný. 200x

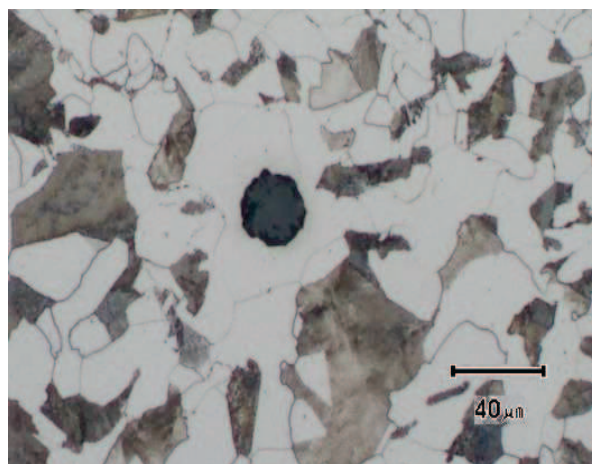


Obr. 6.5. vzorek č. 1
neleptaný 100x

Obr. 6.6. zobrazuje vměstek III. typu šedá část vměstku je tvořena MnS a černé jádro je tvořeno Al_2O_3 . Na obr. 6.7. je viditelná feriticko-perlitické struktura. Struktura je převážně feritická.



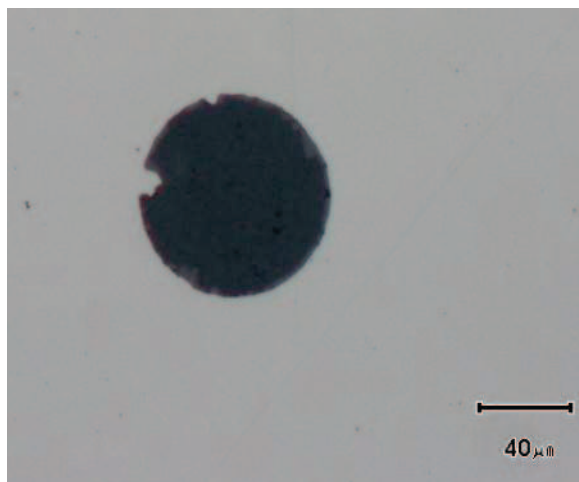
Obr. 6.6. vzorek č. 1
neleptaný 500x



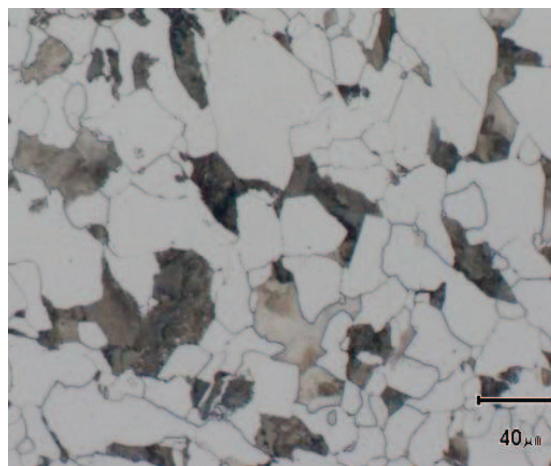
Obr. 6.7. vzorek č. 1
leptaný 200x

Ve struktuře vzorku č. 2 jsou obsaženy pouze vměstky III. typu. Vměstky III. typu dosahují velikosti až cca 120 μm . Struktura vzorku je feriticko– perlitická.

Obr. 6.8. zobrazuje vměstek III. typu převážně globulárního tvaru o průměru cca 80 μm . Z obr. 6.9. je znatelná feriticko-perlitická struktura. Struktura je opět převážně feritická.



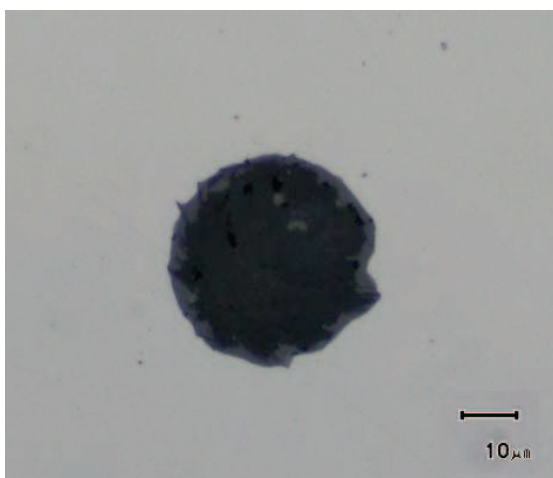
Obr. 6.8. vzorek č. 2 neleptaný
200x



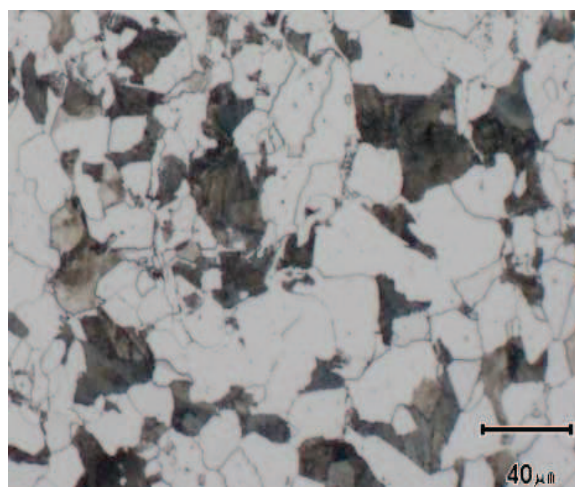
Obr. 6.9. vzorek č. 2 leptaný
200x

Struktura vzorku č. 3 obsahuje vměstky II. a III. typu. Vměstky III. typu dosahují velikosti až cca 50 μm . Většina vměstků III. typu má globulární tvar. Výskyt vměstků II. typu ve struktuře je spíše ojedinělý.

Na obr. 6.10. je vměstek III. typu o průměru cca 30 μm . Na obr. 6.11. je viditelná feriticko – perlitická struktura. Struktura je převážně feritická.

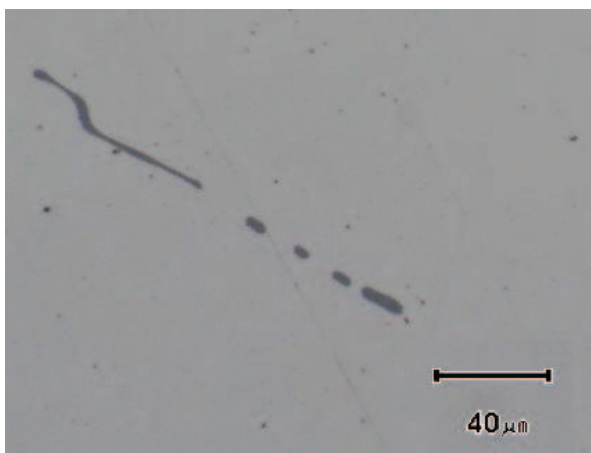


Obr. 6.10. vzorek č. 3
neleptaný 500x

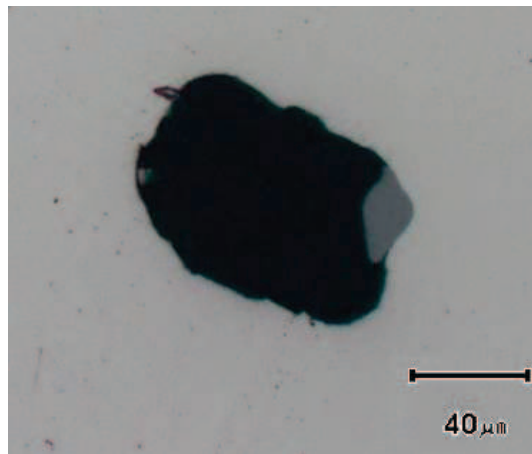


Obr. 6.11. vzorek č. 3 leptaný
200x

Na obr. 6.12. jsou viditelné sulfidické vměstky II. typu. Obr. 6.13. zobrazuje výskyt řediny ve struktuře vzorku č. 3. Výskyt ředin byl zaznamenán pouze u tohoto vzorku.



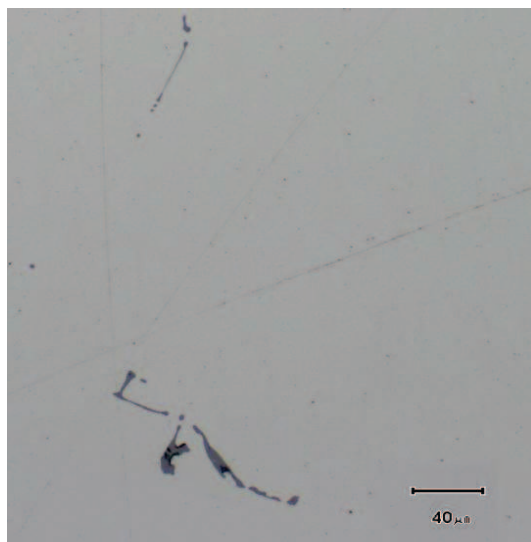
Obr. 6.12. vzorek č. 3 neleptaný
200x



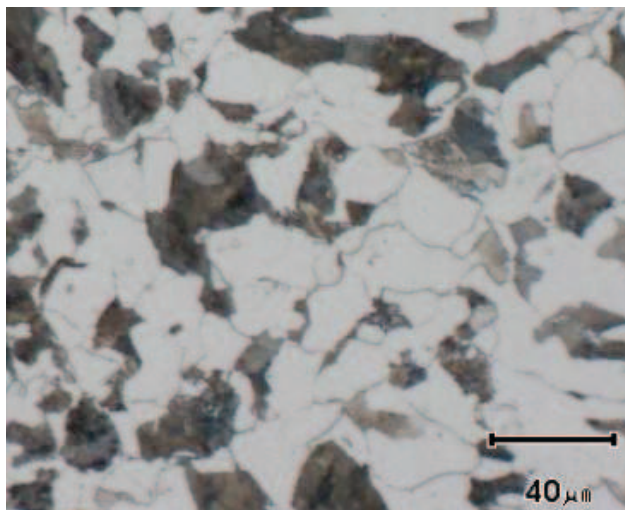
Obr. 6.13. vzorek č. 3 neleptaný
200x

Struktura vzorku č. 4 je feriticko – perlitická a obsahuje vměstky II. a III. typu. Vměstky III. typu dosahují velikosti až cca 15 μm a mají spíše hranatý tvar.

Z obr. 6.14. jsou znatelné sulfidické vměstky II. typu, které jsou na hranici zrn. Z obr. 6.15. je zřejmé, že struktura vzorku je feriticko – perlitická. Struktura je tvořena převážně feritem.



Obr. 6.14. vzorek č. 4.
neleptaný 200x



Obr. 6.15. vzorek č. 4
leptaný 200x

Vzorek č. 5. je odebraný přímo z tepelné osy nálitku. Struktura obsahuje vměstky II. a III. typu. Většina vměstků III. typu má hranatý tvar a velikost těchto vměstků dosahuje až cca 15 μm . Tento vzorek obsahuje vyšší výskyt vměstků II. typu, než vzorky ostatní. Struktura vzorku č. 5 je perliticko-feritická převážně perlitická. Ve vzorku č. 5. se vyskytuje několik oblastí s jemnější strukturou.

Z obr. 6.16. je patrná rozsáhlá oblast MnS vměstků II. typu, které se vyskytují na hranicích zrn. Na obr. 6.17. je viditelná feriticko – perlitická struktura. Struktura je převážně perlitická.

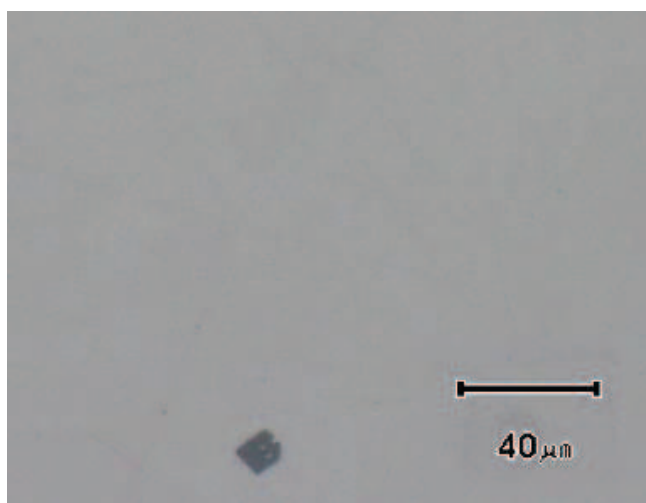


Obr. 6.16. vzorek č. 5.
neleptaný 200x

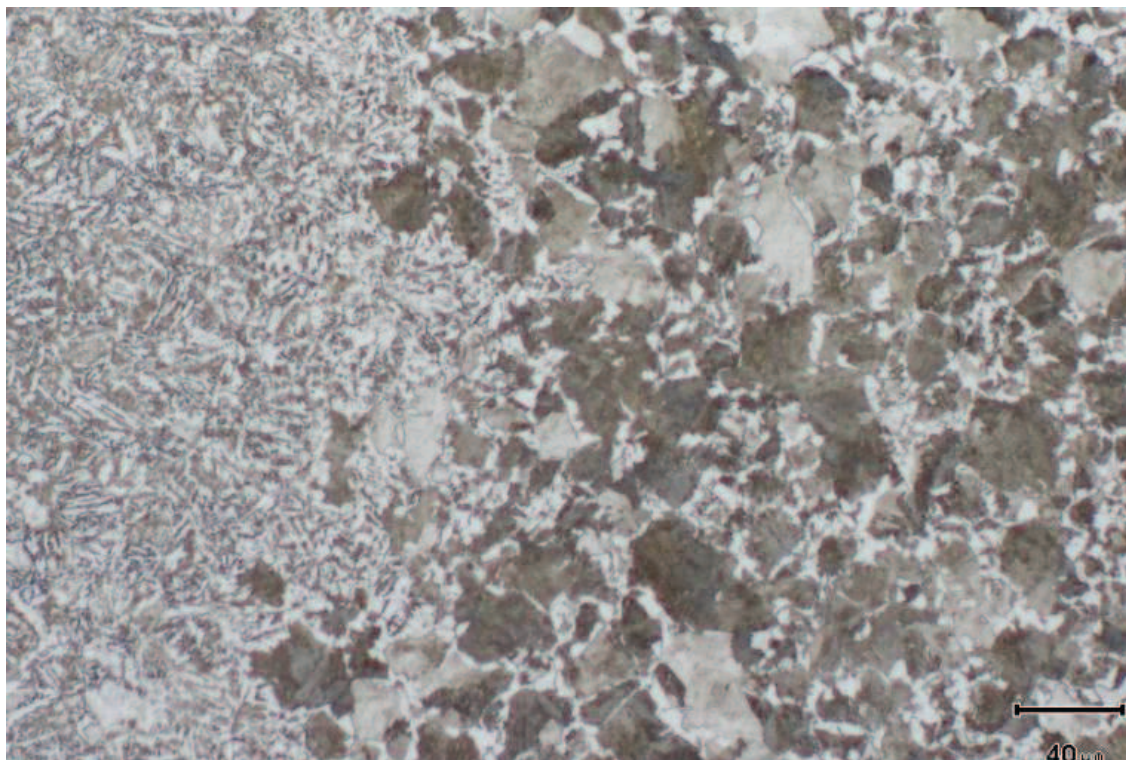


Obr. 6.17. vzorek č. 5.
leptaný 200x

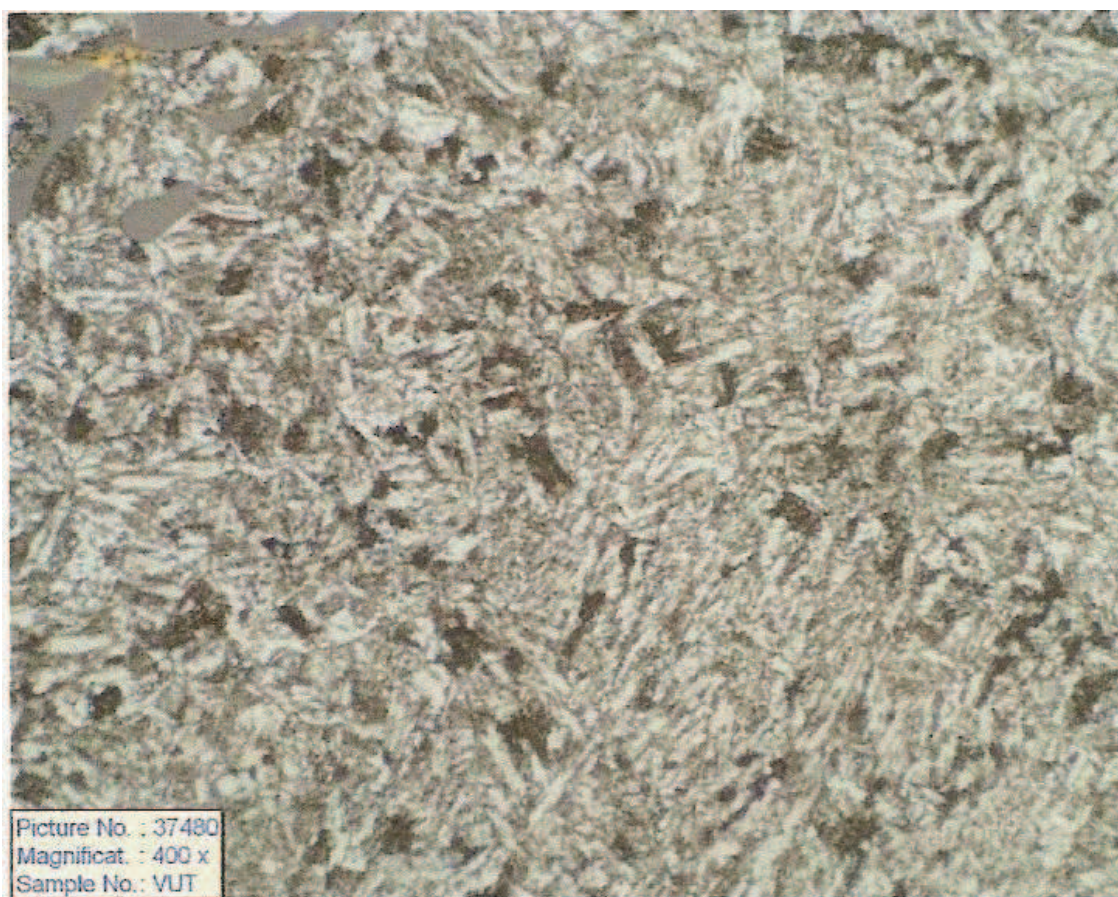
Na obr. 6.18. je vměstek III. typu s hranatým tvarem a velikostí cca 15 μm . Tento typ vměstků je poměrně typický pro vzorek č. 5.



Obr. 6.18. vzorek č. 5.
neleptaný 200x



Obr. 6.19. vzorek č. 5. leptaný 200x



Obr. 6.20. vzorek č. 5. leptaný 400x [19]

Ve vzorku č. 5. jsou patrné dvě strukturní oblasti. Jemnější struktura je způsobena dendritickou segregací viz. obr. 6.20. Mezidendritické prostory tvoří bainit a jemný perlit [19].

Osy dendritů v hrubozrnnější struktuře (pravá část obr. 6.19.) tvoří lamelární perlit a ferit. Ve struktuře vzorku č. 5. je obsaženo zřejmě více perlitu, než ve vzorcích č. 1. až č. 4.

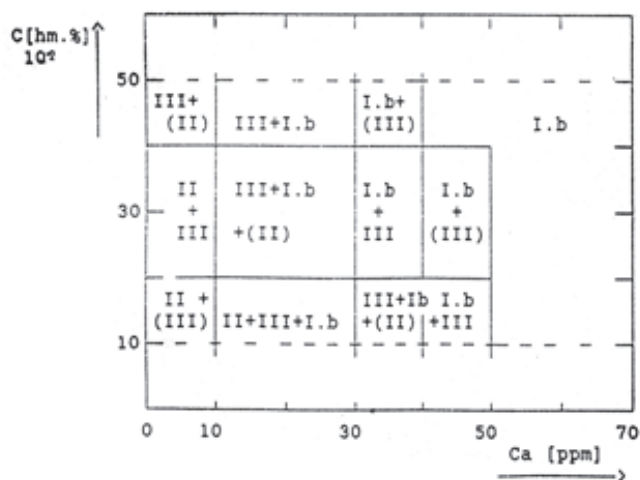
6.3.1. VYHODNOCENÍ METALOGRAFIE

Materiál vzorků z nálitku obsahuje vměstky II. a III. typu. S klesající vzdáleností od tepelné osy nálitku roste množství vměstků. Současně se zvyšuje podíl vměstků II. typu. Naopak podíl vměstků III. typu se s klesající se vzdáleností od tepelné osy nálitku snižuje.

Struktura vzorků č. 1. až č. 4. je feriticko – perlitická se zřejmě vyšším obsahem feritu. Vzorek č. 5 (oblast v okolí staženiny) má strukturu feriticko – perlitickou s převažujícím obsahem perlitu, což by mohlo být dáno vlivem segregace uhlíku a manganu do tepelné osy.

U vzorku č. 3 se místně objevovaly vady typu ředin. U žádného z ostatních vzorků nebyly řediny sledovány.

Při výrobě bylo požadováno, aby ocel byla modifikována vápníkem. Vzorek po modifikaci obsahoval pouze 10 ppm Ca. Nízký obsah vápníku nezajistí dostatečnou modifikaci vměstků na typ Ib. Podle grafu na obr. 6.21 jsou při obsahu 0,20 % C a obsahu vápníku 10 ppm je možné ve struktuře očekávat vměstky struktury II. a III. typu. To je v souladu i s metalografickým hodnocením, při kterém byly ve všech vzorcích nalezeny právě tyto typy vměstků.



Vzhledem ke vzniku nevhodné morfologie vměstků především II. Typu po modifikaci doporučuji:

Po procesu závěrečné dezoxidace hliníkem provést modifikaci vápníkem. Při obsahu 0,20 % C v tavenině navrhuji zvýšit množství vápníku na 30 až 40 ppm. Takový obsah Ca by měl vést ke tvorbě vměstků typu I.b případně III. typu.

Obr. 6.21. Vliv obsahu uhlíku a vápníku na typ vměstků vznikajících v ocelích [2].

6.4 VIZUÁLNÍ KONTROLA PODNÁLITKOVÉ OBLASTI

V etapě optimalizace výrobní technologie byla provedena numerická simulace v programu Procast. Pro odlití odlitku byla použita technologie navržená podle čtvrté varianty (tab. 3.2.). Výskyt makrostaženin nebyl podle této varianty v odlitku predikován (obr. 6.22).



Obr. 6.22. Predikce makrostaženin [16].

Po odřezání nálitku byla provedena vizuální kontrola. Na obr. 6.23. je viditelná značně velká otevřená staženina. Během odlévání došlo k přelití nálitku viz kap. 4.2. Z důvodu rozporu mezi stavem po odlití (staženina v odlitku) a stavem simulovaným ve 4. variantě (obr. 6.22.) byla provedena další simulace plnění a chladnutí a tuhnutí v Programu Procast. Tato varianta již uvažovala vlastní přelití nálitku (obr. 6.24.). Oblast staženiny v této variantě je uvedena na obr. 6.23. Z něj je patrné, že výsledky simulace jsou již v souladu se skutečným stavem. Tím se potvrdilo, že vznik staženiny byl zapříčiněn přelitím nálitku (zvýšení rychlosti tuhnutí v nálitku).

Vzhledem k výskytu této vady by v praxi došlo k navýšení nákladů na opravy (drážkování, svařování) a ke zvýšení výrobního času.



Obr. 6.23. Otevřená staženina v podnáltkové oblasti.



Obr. 6.24. Predikce makrostaženin po přelití nálitku [16].

6.5 DEFECTOSKOPICKÉ ZKOUŠKY

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku dlouhodobého tuhnutí ve vybraných místech odlitku. Při sledování vlivu podmínek tuhnutí na výskyt vad odlitku byly sledovány vady zejména v podnálitkové oblasti. V této oblasti byly provedeny následující nedestructivní zkoušky:

- zkouška ultrazvukem
- elektromagnetická polévací zkouška

Zkouška ultrazvukem se zaměřuje na identifikaci vnitřních porušení souvislosti struktury (trhliny, praskliny, staženiny). Tato zkouška byla provedena v litém stavu po opracování zkoušeného povrchu za teploty 20° C. Parametry použitých sond jsou uvedeny v tab. 6.13. Rozsah indikovaných vad je uveden v tab. 6.14. Zkouška neindikovala žádné vady v celém objemu podnálitkové oblasti.

Tab. 6.13. Parametry použitých sond.

| Sonda | Úhel [°] | Typ | Rozměr [mm] | Frekvence [MHz] | Zesílení [Db] | Rozsah [mm] |
|-------|----------|---------|-------------|-----------------|---------------|-------------|
| B2S | 0 | Přímá | 24 | 2 | | 250, 500 |
| SEB2 | 0 | Dvojitá | 7x18 | 2 | | 100 |

Tab. 6.14. Rozsah indikace vad.

| | registrovaná velikost | maximální velikost |
|------------|-----------------------|--------------------|
| bodová | 4 mm | |
| plošná | 3 mm | 8 mm |
| nelineární | | 8 mm |

Elektromagnetická polévací zkouška se zaměřuje na identifikaci povrchového a podpovrchového porušení souvislosti struktury a dutin v podnálitkové oblasti odlitku. Tato zkouška byla provedena v litém stavu po opracování povrchu za teploty 20° C. Byla použita fluorescenční mokrá metoda s indikací lineárních a nelineárních vad 2mm. Zkouška neindikovala porušení souvislosti (trhliny, praskliny) a dutiny (řediny, bubliny).

V odlitku byly nalezeny oblasti výskytu trhlin převážně na místech kontaktních chladítek obr. 6.25. Diplomová práce je zaměřena převážně na oblast nálitku a podnálitkovou oblast, a proto nebyly tyto vady hodnoceny.



Obr. 6.25. Trhliny na spodním chladítku.

7. EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Postup optimalizace vedl cestou snižování objemu nálitku viz. kap. 3.2. K odlití zkušebního odlitku došlo dle výrobní technologie uvedené ve variantě č. 4. Při odlévání došlo k přelití nálitku nad dutinu formy, což vedlo ke vzniku staženiny v odlitku viz. kapitola 6.4.

Vzhledem k optimalizaci výrobní technologie došlo z ekonomického hlediska k následujícím změnám:

- Snižování výšky nálitku a tedy i výšky rámu, čímž došlo ke snížení výdajů na formovací směs.
- Snižování objemu nataveného kovu, ale zároveň zvýšení zbytku kovu na LF. Toto vedlo k poklesu nákladů v tavírně o 10%.
- Snižování nákladů na tepelné zpracování o 15% vzhledem k menšímu objemu nálitku.
- Zvýšení počtu a celkového objemu chladítek a tím ke zvýšení nákladů na výrobu chladítek o 51%.

Vlivem těchto faktorů došlo k celkovému průměrnému snížení celkových nákladů na výrobu zkušebního odlitku o 4%.

8. ZÁVĚR

Optimalizace výrobní technologie ložiska vyráběného slévárnou Žďas a.s. se ubírala cestou snižování objemu nálitku. Byly provedeny numerické simulace původní technologie a dalších tří návrhů výrobní technologie. Jako optimální varianta byla zvolena varianta č. 4, kde došlo ke snížení průměru a výšky nálitku.

Při odlévání zkušebního odlitku došlo k přelití nálitku, s čímž numerická simulace podle varianty č. 4 neuvažovala. Po odříznutí nálitku byl zjištěn výskyt staženiny v podnálitkové oblasti. Vzhledem k tomu byla provedena numerická simulace uvažující přelití nálitku. Numerickou simulací bylo potvrzeno, že v případě přelití nálitku dochází ke vzniku makrostaženin v podnálitkové oblasti. Tím se potvrdilo, že vznik staženiny souvisel s přelitím nálitku a velikost nálitku by v případě jeho nepřelití byla pravděpodobně dostatečná.

V rámci experimentu byly provedeny zkoušky mechanických vlastností a chemického složení. Výsledky zkoušek byly vyhovující pro vnitřní předpisy slévárny Žďas a.s., ale i pro požadavky určené normou pro daný materiál. Dále byly provedeny defektoskopické zkoušky a to zkouška ultrazvukem a elektromagnetická polévací zkouška v podnálitkové oblasti. Tyto zkoušky neindikovaly žádnou vadu. Z výsledků metalografického hodnocení vyplynulo, že se ve struktuře odlitku vyskytují vměstky s nevhodnou morfologií (vměstky II. typu). To souvisí s nedostatečným stupněm modifikace oceli a lze proto doporučit zvýšit obsah Ca pro modifikaci.

Z výsledků ekonomického zhodnocení výrobní technologie zkušebního odlitku vyplývá, že došlo k celkovému průměrnému snížení nákladů o 4%. Zároveň by v případě výroby skutečného odlitku pro zákazníka došlo ke zvýšení celkového výrobního času vzhledem k vyššímu objemu vad. To by mohlo vést k nesplnění dodací lhůty dojednané se zákazníkem.

Doporučení:

- Provést optimalizaci původní technologie snížením velikosti nálitku, ale ne tak razantně jako to bylo provedeno, dle varianty 4. Tím se zvýší pravděpodobnost výroby zdravého odlitku i při nedodržení některých výrobních parametrů.
- Využít potenciálu LF a VD ke snížení obsahu vměstků a změny jejich morfologie.

Práce provedené v rámci této diplomové práce jsou dílčí částí projektu TIP č. FR – TI1/070 – Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních ocelových odlitků.

SEZNAM LITERATURY

- [1] LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. *Metalurgické vady ocelových odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
- [2] ŠENBERGER, J., aj. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632- 9.
- [3] *Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací* [online] 2009 [cit. 2011-03-11]. Projekt FR-TI1/070 – Výzkum a optimalizace technologie výroby masivních odlitků (2009-2012, MPO/FR). dostupné z [www: http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FR-TI1%2F070](http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=FR-TI1%2F070).
- [4] ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. *Podmínky tuhnutí těžkých odlitků a jejich vliv na vlastnosti odlitků*. Slévárenství. 2010, roč. 58, č. 5-6, s. 136-140. ISSN 0037-6825.
- [5] ELBEL, T., aj. *Vady odlitků ze slitin železa*. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
- [6] HAVLÍČEK, F.: *Trhliny a praskliny v odlitcích*. Slévárenství, č. 1, rok 1998, ročník 46, str.37-46.
- [7] HAVLÍČEK, F.: *Vliv konstrukce odlitků na vznik trhlin a prasklin*. Slévárenství, č. 2/3, rok 2007, ročník 55, str.73-80.
- [8] *Metallurgical Technologies, inc.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-26]. Corrosion assisted fatigue cracking of a 316l stainless steel mozzle sleeve from A chemical processing vessel. Dostupné z WWW: <<http://www.met-tech.com/cracked-nozzle-analysis.html>>.
- [9] SAIP, J.; KAŇÁK J.: *Stvolové vycezeniny u těžkých ocelových odlitků*. Slévárenství, 1984, č. 10, s.414-419.
- [10] KAŇÁK J.; SAIP J.: *Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost ocelových odlitků*. Slévárenství, 1984, č. 10, s.420-424.
- [11] *Vliv chemického složení a kinetiky krystalizace na tvorbu sulfidických vměstků v ocelích*. In FRANCOVÁ, H., et al. *5. mezinárodní konference metalurgie a materiálů* [online]. Hradec nad moravicí : METAL, 2006 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2006/sbornik/papers/125.pdf>>.
- [12] *Metalurgie oceli* [online]. 2006 [cit. 2011-05-23]. Vliv dezoxidace na morfologii vměstků. Dostupné z WWW: <http://metalurgie-oceli.webz.cz/2_7_4.html>.

- [13] BŮŽEK, Z.; KOSŇOVSKÝ, Z. : *Lasturový lom těžkých odlitků. Sborník přednášek - Mezinárodní vědecká konference VŠB - Techn. univ. Ostrava*, 1995, str. 109-116.
- [14] ČECH, J. ZÁDĚRA, A., *Zpráva z měření teplotního pole odlitku ložiska ve slévárně Žďas. Žďár nad Sázavou* : 2.11.2010. 5 s.
- [15] KOLDA, Vlastimil. *Numerická simulace lití, tuhnutí a predikce vzniku staženin v odlitku : ložisko*. Brno : MECAS ESI s.r.o., 11.11.2009. 14 s.
- [16] KOLDA, Vlastimil. *Optimalizace technologie ložiska*. Brno: MECAS ESI s.r.o., 12.1.2010. 10 s.
- [17] *Normy* [online]. 2005 [cit. 2011-05-23]. ČSN 42 2712 (422712). Dostupné z WWW: <<http://shop.normy.biz/d.php?k=3759>>.
- [18] *Vysoká škola chemicko - technologická v Praze* [online]. 2009 [cit. 2011-05-26]. Metalografie 1. Dostupné z www: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm>
- [19] NOVÁK, J. *Protokol z vyhodnocení mikrostruktury ložiska. Žďas a.s., 2011. 1s.*